



**Уральский
федеральный
университет**

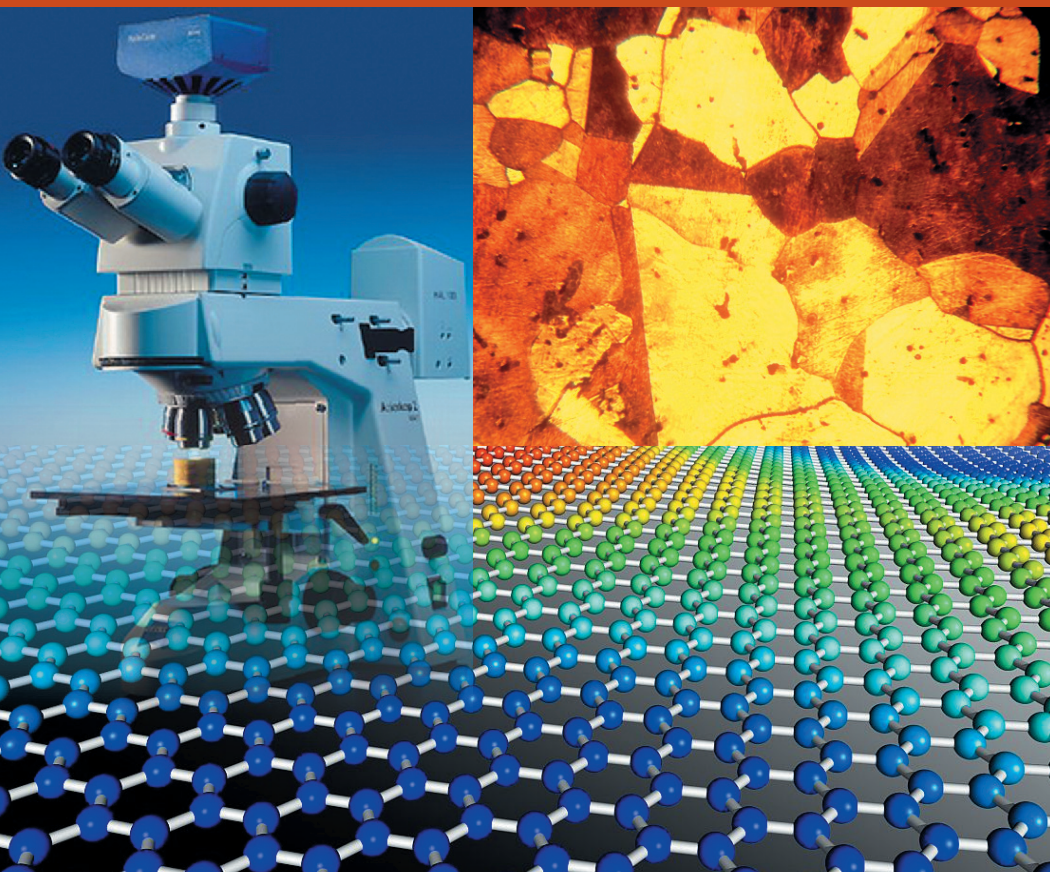
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

**Институт
материаловедения
и металлургии**

**В. Р. БАРАЗ
М. А. ФИЛИППОВ
М. А. ГЕРВАСЬЕВ**

НАЗНАЧЕНИЕ И ВЫБОР МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В. Р. Бараз, М. А. Филиппов, М. А. Гervasьев

Назначение и выбор металлических материалов

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлениям подготовки
150100 — Материаловедение и технология материалов
и 150400 — Металлургия

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2016

УДК 669.2/.8.017(075.8)

ББК 34.23я73

Б24

Рецензенты:

кафедра металлургии, сварочного производства и методики профессионального образования Российского государственного профессионально-педагогического университета — РГППУ (завкафедрой д-р техн. наук, проф. *Б. Н. Гузанов*);

д-р техн. наук, проф. *Б. А. Потехин* (Уральский государственный лесотехнический университет)

Научный редактор — д-р техн. наук, проф. *В. В. Березовская*

Бараз, В. Р.

Б24 Назначение и выбор металлических материалов : учебное пособие / В. Р. Бараз, М. А. Филиппов, М. А. Гервасьев. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 192 с.

ISBN 978-5-7996-1710-3

В пособии приведены справочные данные и сформулированы основные принципы, которыми следует руководствоваться при выборе металлических сплавов различного назначения и технологий их термической обработки. Рассмотрены примеры задач по выбору металлических сплавов и упрочняющих технологий для типичных деталей машиностроения. Представлена компьютерная программа автоматизированного выбора материалов и технологий в машиностроении и методика практического пользования этой программой.

Учебное пособие предназначено для студентов машиностроительных и металлургических специальностей, а также может быть полезно для инженерно-технических работников предприятий и научно-исследовательских институтов.

Библиогр.: 11 назв. Табл. 34. Рис. 75.

УДК 669.2/.8.017(075.8)

ББК 34.23я73

ISBN 978-5-7996-1710-3

© Уральский федеральный
университет, 2016

Введение

Профессиональная обязанность материаловеда-технолога — уметь технически грамотно и обоснованно решать задачи по выбору материала для конкретной детали и технологии ее получения. Обычно задание на выбор материала и технологии его обработки исходит от конструктора, который формирует перечень требуемых эксплуатационных и технологических показателей (в виде цифр и пожеланий). Однако подобные формулировки практически всегда оказываются неполными, а иногда и не совсем точными. Поэтому материаловеду зачастую приходится решать такую задачу в ситуации неполного знания об условиях работы данной детали, не имея исчерпывающих представлений об уровне функциональных свойств используемого материала.

Принятию решения по выбору нужного материала (из числа имеющихся) обычно предшествует обстоятельный сбор более полной информации и последующий тщательный ее анализ по поводу существующей конструкции или имеющегося агрегата, для которых предназначена искомая деталь. Такой информационный задел может включать сведения о зарегистрированных недостатках, отказах и поломках. Полезными также являются данные о том, представляет ли изделие собой оригинальную конструкторскую разработку или оказывается усовершенствованием уже освоенной. Кроме того, важно знать, определяет ли материал качество и технологичность конструкции решающим образом или же он обеспечивает вторичные функции. Приходится, наконец, учитывать и другие немаловажные факторы — предполагаемый объем производства и, соответственно, планируемое потребление материала, экономические и другие разумные соображения.

В рамках данного справочного пособия возможные ситуации по выбору подходящего материала ориентированы на поиск такового из чис-

ла уже известных и освоенных промышленностью. Обычно каждый случай решения задачи по поиску нужного материала и приемлемого технологического режима имеет вполне индивидуальный характер, поскольку касается конкретной ситуации. Тем не менее сама процедура изыскания материала подчиняется определенному алгоритму и включает осуществление ряда последовательных действий. Отметим наиболее существенные из них.

1. Оценить условия работы детали и определить перечень требуемых свойств и их числовые показатели. Обычно принимаются во внимание ряд стандартных механических, физико-химических и технологических характеристик (например, показатели прочности и пластичности, величина удельного электросопротивления, обрабатываемость резанием, свариваемость и т. д.).

2. Определить группу материалов по следующим видам: конструкционные стали общего назначения, инструментальные стали, специальные стали и сплавы (жаропрочные, нержавеющие, износостойкие и проч.), чугуны, цветные сплавы.

Для помощи в решении этого вопроса обычно следует использовать технические справочники и учебную литературу, где приведены данные о примерных назначениях сталей, сплавов, неметаллических материалов для различных изделий. В настоящем справочном пособии приведены наиболее распространенные и доступные сведения о разнообразных металлических материалах. В случае надобности иметь более полные и подробные сведения можно воспользоваться приведенным библиографическим списком [1—11]. В некоторых случаях удастся почерпнуть полезную информацию из оригинальных научных публикаций в журналах или из монографий. Наконец, мощным современным средством поиска является наличие ряда компьютерных баз данных, которые облегчают формальный поиск материала (чаще всего по показателям механических характеристик). Однако использование и этого метода также может привести к неоптимальному решению, так как весьма трудно учесть множество разнонаправленных факторов, которые в совокупности определяют соотношение качества и цены изделия, обуславливающих его конкурентоспособность.

3. Следует учитывать экономические соображения — если для данного типа деталей можно использовать несколько различных марок, например, сталей, то выбирается наименее легированная, но обеспечивающая прокаливаемость заданного конкретного сечения. И, нао-

борот, дорогостоящие легированные стали, содержащие Ni, Mo, W, V, или цветные сплавы следует рекомендовать лишь в тех случаях, когда выбор более дешевых материалов не способен обеспечить требования, обусловленные заданием.

4. Важно учитывать технологические свойства — это позволяет использовать более производительные и экономичные процессы. В результате удастся не только улучшить функциональные характеристики изделия, но и снизить трудоемкость его изготовления, сократить расход материалов (например, за счет уменьшения доли отходов).

5. Окончательные свойства, а также свойства на стадии технологического передела изделия могут обеспечиваться термической обработкой, операциями ОМД, резания, сварки или определенными видами комбинированных обработок (термомеханической, химико-термической). Поэтому важную роль следует отвести подбору приемлемых технологических режимов обработки, учитывая, что возможность регулирования структуры позволяет управлять свойствами в нужном направлении.

Выбор того или иного материала для конкретного изделия или конструкции будет рациональным и экономически эффективным, если при минимальном легировании обеспечивается требуемый уровень конструктивной прочности, а удорожание материала в результате легирования и изменения технологии производства не будет превышать экономический эффект, достигаемый посредством следующих технико-экономических факторов:

- обеспечение необходимой надежности и долговечности (хладостойкость, сопротивление усталости, износостойкость и т. п.);
- получение новых технологических и эксплуатационных свойств (например, коррозионной стойкости, жаропрочности, свариваемости и проч.);
- уменьшение массы;
- снижение расходов на изготовление, монтаж, транспортирование и эксплуатацию.

Подобные соображения оказываются вполне целесообразными при решении практической задачи, связанной с выбором подходящего материала и назначением обоснованной технологии.

При написании настоящего пособия авторы исходили из разумного предположения, что читатель хотя бы в общих чертах имеет представление о базовых положениях термической обработки металличе-

ских материалов. Тем не менее, было сочтено возможным в 1-й главе напомнить самые необходимые сведения о способах и технологических приемах термической обработки как сталей, так и сплавов на основе цветных металлов.

Само учебное пособие построено таким образом, чтобы получение требуемой информации можно было осуществить двумя способами. В первом случае (это изложено во 2-й главе) пользователю предлагается классическая и вполне привычная табличная система изложения первичных справочных данных — в достаточно компактной форме приводятся полезные сведения о том, какие именно металлические материалы и для какого рода изделий могут быть рекомендованы. Охватывается достаточно широкий круг сталей и сплавов различного назначения — от обычных углеродистых марок сталей до сложнолегированных сплавов, включая и разнообразную группу сплавов на основе цветных металлов (Cu, Al, Mg, Ni, Ti).

В дальнейшем для получения более исчерпывающей информации о выбранном материале и технологическом способе его переработки (температуры критических точек, химический состав, рекомендуемые режимы термической обработки, физико-механические и технологические свойства, вид поставки, возможные заменители и проч.) следует уже использовать специальную справочную литературу. Список таких марочников приведен в заключительном разделе данного пособия.

Практическое исполнение этого методического подхода (описано в 3 и 4-й главах) подробно проиллюстрировано на конкретных примерах, рассматривающих выбор потребных материалов и приемлемых технологических режимов их обработки применительно к конструкционным и инструментальным сталям и сплавам. При этом авторы сочли возможным в этих главах в некоторых случаях дать достаточно развернутые сведения о рассматриваемых материалах (их назначение, технологические особенности обработки, служебные свойства и проч.).

Второй способ получения нужной информации основан на применении современных компьютерных технологий (представлено в 5-й главе). В частности, для этой цели рекомендуется оригинальный программный комплекс выбора марки сталей под названием СТАЛЬ, включающий автономный программный модуль и базу данных. Особенность программного комплекса состоит в том, что он содержит справочные данные о широком перечне металлических материалов, ограниченных, однако, набором только машиностроительных сталей.

В целом данное учебное пособие, по мнению авторов, дает возможность пользователю получить полезные навыки решения довольно распространенных материаловедческих задач. При этом достигается оно с использованием как традиционных приемов, основанных на анализе сведений из справочной литературы, так и путем применения более современных методов в форме компьютерных технологий, благодаря которым поиск нужного материала осуществляется по определенному алгоритму, когда компьютер сам «ведет» пользователя к получению конечного результата.

Глава 1

Общие сведения о металлах и основные положения термической обработки

1.1. Классификация металлов

Металлические материалы принято разделять на две большие группы — черные и цветные металлы. К черным металлам обычно принадлежат железо и его сплавы (сталь, чугун, ферросплавы). К этой группе часто условно относят также такие металлы, как хром, марганец, которые в основном используются в качестве добавок к железу. Однако их правильнее выделять в отдельную группу цветных металлов — легирующих металлов (легирующих элементов).

Цветные металлы — это промышленное название всех остальных металлов. В свою очередь цветные металлы разделяются на несколько групп (однако общепринятая классификация отсутствует). Так, в зависимости от плотности цветные металлы принято делить на *легкие* и *тяжелые*. К первой группе относятся такие, которые имеют плотность меньше 5 г/см^3 (алюминий, магний, титан, бериллий, литий и др.), ко второй группе — те, у которых плотность выше указанной величины (медь, никель, кобальт, свинец, олово, цинк и др.). Самым легким металлом является литий (плотность $0,53 \text{ г/см}^3$). Наиболее тяжелый металл в настоящее время определенно назвать невозможно, так как плотности осмия и иридия — двух самых тяжелых металлов — почти равны (около $22,6 \text{ г/см}^3$ — ровно в два раза выше плотности свинца). Однако вычислить их точную плотность крайне сложно: для этого нужно полностью очистить металлы, поскольку любые примеси снижают их плотность.

В зависимости от температуры плавления используется градация на *легкоплавкие* и *тугоплавкие* металлы. Температуры плавления металлов лежат в диапазоне от -39°C (ртуть) до 3410°C (вольфрам). В качестве пороговой принимается температура, равная 1000°C (в некоторых справочных изданиях подобное разделение основывается на сравнении с температурой плавления железа, т. е. 1539°C). Соответственно, если придерживаться первой градации, к числу легкоплавких металлов следует отнести ртуть, олово, кадмий, свинец, цинк, магний, висмут, таллий, сурьму, алюминий; тугоплавкими являются серебро, медь, золото, железо, никель, титан, молибден, хром, ниобий, тантал и, конечно же, вольфрам.

Кроме того, металлы принято делить на *благородные* металлы (золото, серебро, платина, палладий, радий, рутений, иридий и осмий) и *редкие* металлы (вольфрам, хром, ванадий, молибден, тантал, радий и подгруппа *редкоземельных* — церий, торий, скандий, иттрий и др.). Появление термина *редкие* металлы объясняется сравнительно поздним освоением и использованием этих элементов, что связано с их малой распространенностью (или рассеянностью в земной коре), а также трудностями извлечения из сырья для выделения в чистом виде.

Довольно любопытным следует признать существующее природное распределение элементов. Их количественная оценка в настоящее время выполнена достаточно точно. В земной коре (*литосфере*) на глубине приблизительно 1 км содержатся следующие элементы (их содержание дано в массовых процентах):

| | |
|----------------|------------|
| Кислород | 46,6 |
| Кремний | 27,7 |
| Алюминий | 8,0 |
| Железо | 5,0 |
| Магний | 2,1 |
| Титан | 0,6 |
| Медь | 0,01 |
| Никель | 0,01 |
| Олово | 0,004 |
| Цинк | 0,004 |
| Свинец | 0,0016 |
| Серебро | 0,00001 |
| Золото | 0,0000005 |
| Платина | 0,00000005 |

Цветные металлы и сплавы на их основе широко применяются в промышленности и быту благодаря целому комплексу механических, физических и химических свойств.

Без легких сплавов невозможно было бы развитие современной авиации. Удачное сочетание малого удельного веса с относительно высокой прочностью предопределило их широкое применение не только в авиастроении, но и в других областях техники. Изделия и полуфабрикаты из алюминиевых и магниевых сплавов, полученные литьем и обработкой давлением, являются важнейшими конструкционными материалами в транспортном машиностроении, автотракторной промышленности, судостроении, приборостроении и т. д. Легкие сплавы применяют в гражданском строительстве, для бытовых целей. Высокая электропроводность и химическая стойкость чистого алюминия позволили широко использовать его в электротехнике и химическом аппаратостроении.

Материалы с высокой удельной прочностью (сплавы Ti) предназначены в основном для изготовления высоконагруженных деталей. Некоторые сплавы на основе титана по своей удельной прочности (прочности на единицу веса) значительно превосходят алюминиевые и магниевые сплавы и стали.

Многими ценными качествами обладают такие цветные металлы, как медь, никель и др. Медь после серебра является лучшим проводником тока, что обусловило ее широкое применение в электротехнике. Медь служит также основой многих важных промышленных сплавов: латуней, бронз и др.

Никель является основным компонентом большинства электротехнических, жаростойких, жаропрочных и коррозионностойких сплавов. Весьма широко никель используют в гальванотехнике для защитных покрытий. Он является важнейшим компонентом в лучших специальных сталях.

Тугоплавкие и благородные металлы (вольфрам, молибден, тантал, ниобий, золото, платина, серебро) и их сплавы являются важнейшими конструкционными материалами новой техники.

1.2. Классификация сплавов по способу технологической обработки

Большинство применяемых промышленных сплавов принято условно подразделять в зависимости от способа технологической переработки — на используемые в деформированном состоянии (катаном, прессованном, кованом) или же в литом виде. На рис. 1.1 схематически показаны области существования сплавов этих групп. К деформируемым сплавам обычно относятся такие, составы которых располагаются в интервале концентраций, не превышающих предельную растворимость в твердом состоянии при температуре эвтектического превращения (точка D). Опыт показывает, что сплавы с содержанием второго компонента ниже предела растворимости обладают наилучшей пластичностью и меньшей прочностью, что создает благоприятные условия для осуществления операций обработки давлением. Вместе с тем присутствие в структуре эвтектической составляющей в основном негативно отражается на пластических свойствах и это приводит к резкому снижению способности материалов к пластическому деформированию, а в некоторых условиях такая обработка становится вообще невозможной.

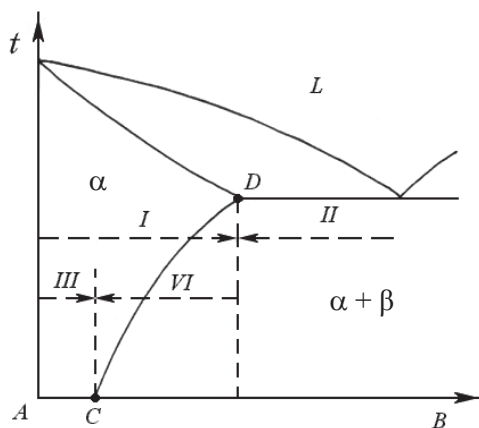


Рис. 1.1. Классификация сплавов по способу технологической обработки: I — деформируемые сплавы; II — литейные сплавы; III — сплавы, не упрочняемые термообработкой; VI — термически упрочняемые сплавы

К литейным сплавам традиционно относятся такие, которые испытывают эвтектическую кристаллизацию. Основным технологический признак подобных материалов — хорошая жидкотекучесть, т.е. способность заполнять литейную форму. Этот показатель зависит от температурного интервала кристаллизации: чем более узким он оказывается, тем большей жидкотекучестью обладает материал. Поэтому наилучшую жидкотекучесть имеют чистые металлы и сплавы эвтектического состава, у которых температурный интервал кристаллизации

является нулевым. Вместе с тем сплавы, находящиеся в виде твердых растворов (расположены левее точки максимальной растворимости D), уступают по жидкотекучести до- и заэвтектическим сплавам; причем тем заметнее, чем ближе последние располагаются относительно сплава эвтектического состава и имеют, следовательно, меньший интервал затвердевания. Однако чрезмерная доля эвтектики в структуре литейных сплавов считается нежелательной, поскольку это приводит к ухудшению механических свойств. Поэтому ее приемлемое содержание обычно составляет не более 15–20 %.

В свою очередь деформируемые сплавы подразделяются на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой. Условной границей между такими сплавами является точка С, характеризующая предельную растворимость при комнатной температуре. Понятно, что сплавы, лежащие слева, нельзя обработать на пересыщенный твердый раствор и поэтому они считаются термически неупрочняемыми. В то же время сплавы, расположенные правее, являются стареющими и могут быть упрочнены за счет дисперсионного твердения.

Термическая обработка является эффективным, а порой и единственным доступным средством воздействия на структуру материала и, следовательно, позволяет целенаправленно регулировать его свойства. Поскольку при последующем изложении сведений о различных группах наиболее известных металлов и сплавов на их основе придется пользоваться некоторыми понятиями термической обработки, то познакомимся с основными ее технологическими операциями. Оговоримся сразу, что детальное знакомство с теорией и практикой термической обработки является предметом рассмотрения в рамках специальной учебной дисциплины и поэтому в настоящем пособии даны самые общие представления.

1.3. Разновидности термической обработки

Термической обработкой называется процесс теплового воздействия на металлы и сплавы с целью направленного изменения их структуры и свойств. Очевидно, что такое изменение должно быть достаточно устойчивым и способным сохраняться в течение всего срока службы материала.

Все известные способы термической обработки включают в себя три основные процедуры: нагрев до заданной температуры, последующая выдержка при этой температуре и заключительное охлаждение. Выбор конкретных параметров технологической схемы обработки (температура и скорость нагрева, длительность выдержки, скорость охлаждения) определяется тем, какими желаемыми свойствами должен обладать данный материал.

Существующие виды термической обработки можно условно разделить на следующие основные группы.

1. Предшествующая технологическая обработка может перевести металл в структурно неравновесное состояние. Это наблюдается, например, после кристаллизации, в результате сварки, проведения пластической деформации. Поэтому часто возникает необходимость в выполнении последующей обработки, которая позволяет устранить неблагоприятные последствия предыдущей технологической операции (снять внутренние напряжения, устранить наклеп, получить однородный химический состав фаз). С другой стороны, возможны ситуации, когда необходимо подготовить металлический материал к последующей технологической операции, скажем, обработке резанием, холодной пластической деформации, специальной термической обработке. Во всех этих случаях проводится термическая операция, называемая *отжигом*, которая переводит материал в равновесное состояние. Следовательно, отжиг — это такая термическая обработка, которая способствует получению структуры, близкой к равновесной. При этом принято различать две разновидности отжига — 1-го и 2-го рода. Отжиг 1-го рода обычно не связан с проведением фазовых превращений или же, если они протекают, то не оказывают решающего влияния на формирование структуры (например, рекристаллизационный отжиг, отжиг для снятия напряжений, гомогенизационный отжиг). Напротив, отжиг 2-го рода обязательно основывается на использовании фазовых превращений — эвтектоидного распада, выделения и растворения избыточных фаз. Часто такой отжиг называют отжигом с фазовой перекристаллизацией.

Скорость охлаждения с температуры отжига обычно мала, для этого используется охлаждение с печью или же на воздухе.

2. Возникают случаи, когда термической обработкой намеренно стараются получить неравновесное состояние материала. Для этого проводится термическая обработка, называемая *закалкой*.

Обычно закаленное состояние получается при резком охлаждении, позволяющем существенно подавить диффузию.

У большинства цветных сплавов закалка не сопровождается полиморфными превращениями, поэтому в результате такой операции фиксируется высокотемпературное состояние твердого раствора. В то же время известны сплавы (например, стали), в которых закалка сопровождается полиморфной реакцией, в результате чего высокотемпературная фаза превращается в низкотемпературную по мартенситному механизму (так называемая закалка на мартенсит).

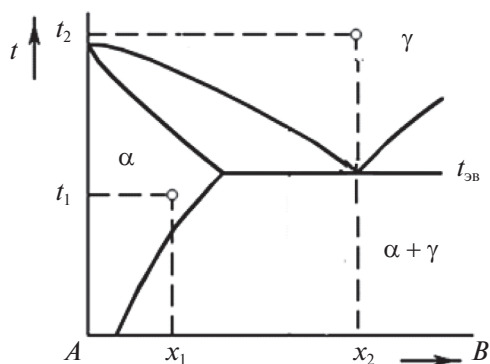


Рис. 1.2. Закалка сплавов на пересыщенный твердый раствор без полиморфного (x_1) и с полиморфным (x_2) превращениями

На рис. 1.2 приведено схематическое изображение участка диаграммы состояния двойной системы А-В, характеризующейся полиморфизмом компонента А. Как видно, α - и γ -фазы представляют собой граничные твердые растворы компонента В на базе соответствующих низко- и высокотемпературной модификаций компонента А. При этом γ -фаза при охлаждении испытывает эвтектоидное превращение (при температуре $t_{эв}$) с образованием смеси фаз $\alpha + \beta$.

На диаграмме показаны два сплава x_1 и x_2 . Химический состав первого подобран так, что он оказывается склонным к старению, благодаря возможности обработки на пересыщенный α -твердый раствор (из однофазной α -области, соответствующей температуре t_1). Второй сплав соответствует эвтектоидному составу. В случае нагрева его в область γ -фазы (температура t_2) и последующего ускоренного охлаждения (закалки) будет подавлен эвтектоидный распад, но окажется возможным протекание полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, идущего по бездиффузионному (мартенситному) механизму. В результате этого произойдет (как и в первом случае) образование также пересыщенной α -фазы, но полученной из высокотемпературного γ -твердого раствора. Такая α -фаза и будет представлять собой мартенсит.

3. Закаленный сплав находится в структурно-неустойчивом состоянии, поэтому он сохраняет потенциальную возможность испыты-

вать самопроизвольно такие превращения, которые будут приближать его равновесному положению. Наиболее заметно эти процессы стимулируются при нагреве, благодаря усилению диффузионной подвижности атомов. Такая термическая обработка, в результате которой в предварительно закаленном сплаве происходят фазовые превращения, приближающие его к равновесному состоянию, называется *старением* или *отпуском*. Следовательно, эти обработки являются вторичными операциями, всегда осуществляемыми после закалки. Обычно термин «старение» используется применительно к сплавам, подвергнутым закалке без полиморфного превращения (большинство сплавов цветных металлов), а «отпуск» — для случая закалки на мартенсит (например, стали и чугуны).

Сочетание закалки со старением или отпуском позволяет получать существенно более высокий уровень свойств (в первую очередь прочностных), чем это достигается в результате отжига.

Как правило, скорость охлаждения с температуры старения (отпуска) не оказывает (за некоторым исключением) влияния на структуру и свойства сплавов.

Применительно к стареющим сплавам по технологическому признаку старение подразделяют на *естественное*, происходящее при комнатной температуре, и *искусственное*, требующее осуществления послезакалочного нагрева. Более привычной операцией является искусственное старение, поскольку для большинства сплавов (исключение составляют алюминиевые) даже длительное вылеживание при комнатной температуре после закалки обычно не приводит к сколь-нибудь практически ощутимому изменению свойств.

На рис. 1.3 в координатах «температура-время» дано схематическое изображение рассмотренных видов термической обработки.

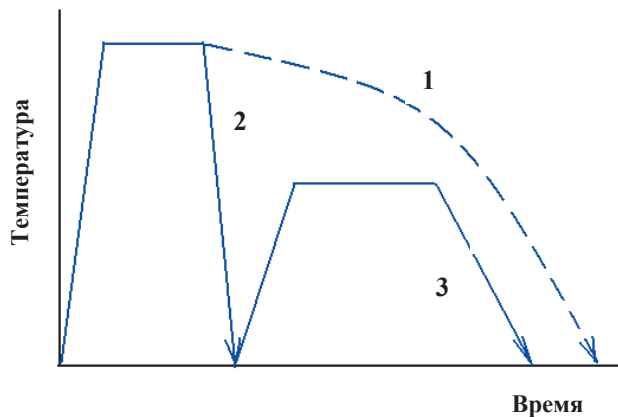


Рис. 1.3. Режимы термообработки:

1 — отжиг; 2 — закалка; 3 — отпуск (старение)

1.4. О термической обработке стали

Для понимания особенностей наиболее характерных технологических приемов термической обработки стали удобно воспользоваться фрагментом известной диаграммы Fe-Fe₃C — ее нижней левой частью (так называемым «стальным углом»). На рис. 1.4 представлен такой фрагмент с указанием типичных равновесных структур (полученных после отжига путем медленного охлаждения из аустенитного состояния) для сталей доэвтектоидного (1), эвтектоидного (2) и заэвтектоидного (3) составов, состоящих соответственно: 1) из феррита и перлита, 2) перлита и 3) вторичного цементита с перлитом.

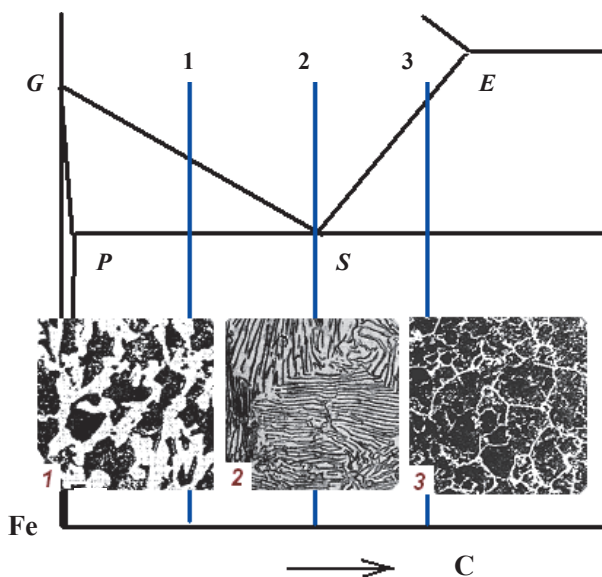


Рис. 1.4. Типичные структуры после отжига стали доэвтектоидной (1), эвтектоидной (2) и заэвтектоидной (3)

Если рассматривать известные технологические способы термической обработки, например конструкционной стали, то фактически они сводятся к следующему. Нужно предварительно полученный при нагреве аустенит в условиях последующего охлаждения подвергнуть распаду с целью приближения стали к структурно-равновесному феррито-цементитному (ферритно-карбидному) состоянию.

Сформировать такое структурное состояние в принципе можно двумя вариантами. Первый состоит в том, что феррито-карбидная смесь образуется непосредственно из аустенита в процессе его последующего охлаждения путем реализации классического диффузионного механизма. Это обеспечивается посредством либо отжига (в условиях медленного печного охлаждения), либо нормализации (если охлаждение ведется на воздухе).

Второй вариант представляется более сложным. В этом случае формирование нужного ферритно-карбидного состояния достигается

ся «окольным» путем: вначале из аустенита непосредственно получается пересыщенный α -твердый раствор (т. е. закалкой на мартенсит путем бездиффузионного фазового превращения), а затем уже при последующей повторной термообработке — отпуске диффузионным механизмом происходит распад мартенсита и образуется в итоге феррито-карбидная смесь требуемого строения.

На рис. 1.5 приведена подобная схема, иллюстрированная изображениями соответствующих структур.



Рис. 1.5. Обобщенная схема термической обработки стали

Назначение определенного вида термообработки диктуется необходимостью получения конкретного уровня свойств изделия. Скажем, для слабонагруженного болта, используемого для крепления номерного знака автомобиля, вполне годится низкоуглеродистая сталь, подвергнутая нормализации. Однако совершенно иные требования следует предъявлять, например, для такой ответственной детали, как болт шарового шарнира передней подвески, работающий в жестких условиях динамического и циклического нагружения. В этом случае нужно уже использовать не только особую легированную сталь, но и подвер-

гнуть ее специальной термической обработке — улучшению, т. е. закалке с высоким отпуском. Напомним, что феррито-карбидная смесь, полученная напрямую из аустенита, отличается от феррито-карбидной смеси, сформированной в результате закалки и отпуска.

Известно, что можно подобрать режимы указанных обработок таким образом, что в одной и той же стали показатели ряда механических свойств (твердости, предела прочности) окажутся практически одинаковыми. Однако по такой важной характеристике, как ударная вязкость, различие окажется принципиальным — отпущенная сталь будет существенно (в разы!) превышать нормализованную. Причина — в особенностях структуры феррито-карбидной смеси: после закалки и высокого отпуска формируется так называемый сорбит отпуска, отличающийся высокодисперсным строением карбидной фазы зернистой формы. В то же время структура сорбита, полученного в результате непосредственного распада аустенита, характеризуется наличием тонкопластинчатых формирований цементита.

1.5. Классификация сталей

1.5.1. Классификация по назначению

Основным классификационным признаком для *машиностроения* является *назначение* стали, которое характеризуется наличием определенного комплекса свойств.

Классификация сталей (и сплавов) по назначению позволяет разделить их на следующие классы.

Класс I. *Конструкционные стали и сплавы*, используемые для изготовления деталей машин и механизмов. Этот класс в свою очередь подразделяется на два подкласса.

А. Конструкционные стали и сплавы, применяемые при *обычных* температурах (цементуемые, улучшаемые, строительные, пружинные).

Б. Конструкционные стали и сплавы, применяемые при *повышенных* температурах (жаропрочные стали и сплавы).

Класс II. *Инструментальные стали и сплавы*, применяемые для изготовления всевозможного инструмента. Содержит три подкласса.

А. Стали для *режущего* инструмента (для придания изделию нужной формы путем отделения стружки).

Б. Стали для *штампового* инструмента (для придания изделию нужной формы посредством различных операций ОМД).

В. Стали для *измерительного* инструмента (для определения соответствия изготавливаемых изделий чертежным размерам).

Класс III. *Стали и сплавы с особыми свойствами*. Они обладают каким-то ярко выраженным физико-химическим свойством. Можно отметить следующие подклассы.

А. Магнитные стали и сплавы (магнитомягкие и магнитотвердые материалы).

Б. Электротехнические стали и сплавы.

В. Нержавеющие (коррозионностойкие) стали и сплавы.

Г. Окалиностойкие (жаростойкие).

Е. Износоустойчивые и т. д.

1.5.2. Классификация по химическому составу

По этому признаку стали принято подразделять следующим образом.

В зависимости от содержания углерода:

- а) низкоуглеродистые стали — до 0,3 % С;
- б) среднеуглеродистые стали — 0,3÷0,7 % С;
- в) высокоуглеродистые стали — свыше 0,7 % С.

В зависимости от содержания легирующих элементов:

- а) низколегированные стали — до 5 % (сумма всех легирующих элементов);
- б) среднелегированные стали — 5÷10 %;
- в) высоколегированные стали — свыше 10 %.

Ниже представлена схема (рис. 1.6), поясняющая принятое назначение сталей в зависимости от содержания углерода.

1.5.3. Классификация по качеству

Нормы содержания вредных примесей (серы и фосфора) — это основной показатель разделения сталей по качеству, %.

Обыкновенного качества — до 0,055 — S и 0,045 — P.

Качественные стали — не более 0,04 — S и 0,035 — P.

Высококачественные стали — не более 0,025 — S и 0,025 — P.

Особо высококачественные стали — не более 0,015 — S и 0,025 — P.

Стали обыкновенного качества бывают только углеродистыми (до 0,5 % C), качественные и высококачественные — углеродистыми и легированными.



Рис. 1.6. Назначение углеродистых сталей в зависимости от химического состава

Стали обыкновенного качества

Стали *обыкновенного* качества выпускают в виде проката (прутки, балки, листы, уголки, трубы, швеллеры и т. п.) в нормализованном состоянии и в зависимости от назначения и комплекса свойств подразделяют на группы: А, Б, В (табл. 1.1).

Стали маркируются сочетанием букв Ст и цифрой (от 0 до 6), показывающей номер марки, а не среднее содержание углерода в ней, хотя с повышением номера содержание углерода в стали увеличивается. Примерное среднее содержание углерода можно определить путем

умножения номера марки стали на коэффициент 0,07. Стали групп Б и В имеют перед маркой буквы Б и В, указывающие на их принадлежность к этим группам. Группа А в обозначении марки стали не указывается.

Таблица 1.1

Стали обыкновенного качества

| Наименование показателей | Категория А По механическим свойствам | Категория Б По химическому составу | Категория В По механическим свойствам и химическому составу |
|---|--|---------------------------------------|--|
| Тип категории | От Ст0 до Ст6 | От БСт0 до БСт6 | От ВСт1 до ВСт5 |
| Маркировка (в зависимости от содержания углерода) | Ст0 Ст1 | Ст2 Ст3 Ст4 | Ст5 Ст6 |
| Содержание С, % | 0,06–0,09 | 0,14–0,22 | 0,38–0,40 |

Стали группы А используют в состоянии поставки для изделий, изготовление которых не сопровождается горячей обработкой. В этом случае они сохраняют структуру нормализации и механические свойства, гарантируемые стандартом.

Стали группы Б применяют для изделий, изготавливаемых с применением горячей обработки (ковка, сварка и в отдельных случаях термическая обработка), при которой исходная структура и механические свойства не сохраняются. Для таких деталей важны сведения о химическом составе, необходимые для определения режима горячей обработки.

Стали группы В дороже, чем стали групп А и Б, их применяют для ответственных деталей (для производства сварных конструкций).

Углеродистые стали обыкновенного качества (всех трех групп) предназначены для изготовления различных металлоконструкций, а также слабонагруженных деталей машин и приборов. Эти стали используются, когда работоспособность деталей и конструкций обеспечивается жесткостью. Углеродистые стали обыкновенного качества широко используются в строительстве при изготовлении железобетонных конструкций. Способностью к свариванию и к холодной обработке давлением отвечают стали групп Б и В номеров 1–4, поэтому из них изготавливают сварные фермы, различные рамы и строительные ме-

таллоконструкции, кроме того, крепежные изделия, часть из которых подвергается цементации.

Среднеуглеродистые стали номеров 5 и 6, обладающие большей прочностью, предназначены для валов, шкивов, шестерен и других деталей грузоподъемных и сельскохозяйственных машин. Некоторые детали из этих сталей групп Б и В подвергаются термической обработке — закалке с последующим высоким отпуском.

Качественные стали

Для них регламентируется содержание по химическому составу и механическим свойствам, а также гарантируется ограничение по концентрации вредных примесей ($S \leq 0,04\%$ и $P \leq 0,035\%$).

Принятая маркировка таких сталей: записываются полное слово «Сталь» и затем две цифры, указывающие среднее содержание углерода в сотых долях процента (мас. %).

Примеры таких сталей с учетом их назначения приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Содержание углерода (мас. %) в качественных сталях

| Строительные свариваемые стали | Конструкционные (машиностроитель- ные) стали | Рессорно- пружинные стали | Инструменталь- ные стали |
|--------------------------------------|--|---------------------------------|-----------------------------|
| 08 | 30 | 60 | 80 |
| 10 | 40 | 70 | 85 |
| 20 | 50 | | |

1.5.4. Классификация по прочности

Прочность оценивается по величине временного сопротивления σ_B :

- а) стали *нормальной* (средней) прочности — до 1000 МПа;
- б) стали *повышенной* прочности — до 1500 МПа;
- в) стали *высокой* прочности — свыше 1500 МПа.

1.5.5. Классификация по степени раскисления

Раскисление — процесс удаления из жидкого металла кислорода, находящегося в виде закиси железа FeO . Это нужно для предотвращения хрупкого разрушения стали при горячей деформации — краснотомкости. В качестве раскислителей (восстановителей железа) используют марганец, кремний и алюминий. Кремний и марганец вводят в виде соответствующих ферросплавов, алюминий же в чистом виде.

Спокойные стали — раскисляют Mn , Si и Al .

Полуспокойные стали — раскисляют Mn и частично Si .

Кипящие стали — раскисляют только Mn .

Спокойные стали маркируют без индекса, полуспокойные и кипящие — с индексом соответственно «пс» и «кп». Кипящие стали производят марок 05кп, 08кп, 10кп, 15кп, 20кп, полуспокойные — 08пс, 10пс, 15пс, 20пс.

Кипящая сталь наиболее дешевая, так как при ее выплавке расходуется минимальное количество специальных добавок и обеспечивается максимальный выход годного продукта. Недостатком ее является сильно развитая зональная ликвация. Соответственно прокат из такой стали более неоднороден по химическому составу, чем прокат из спокойной стали. Вот почему листы и профили, изготовленные из разных частей слитка, различаются по содержанию углерода, серы и фосфора. Поэтому прокат из кипящей стали характеризуется заметной неоднородностью структуры и механических свойств даже для случая одной плавки. В среднем кипящая сталь содержит около 0,02 % кислорода, что в несколько раз больше, чем у спокойной стали; при этом хладостойкость такой стали оказывается пониженной.

Поскольку кипящая сталь раскислена только марганцем, т. е. неполностью, то содержит какое-то количество растворенного кислорода. Во время последующей кристаллизации происходит окисление углерода с выделением большого объема газа CO_2 , который и вызывает эффект «кипения». Значительная часть газовых пузырей остается в слитке, однако в дальнейшем они завариваются при прокатке.

Спокойная сталь гораздо однороднее по химическому составу, чем кипящая сталь. Благодаря присутствию в спокойной стали алюминия, у нее ниже склонность к росту зерна, чем у кипящей стали. Поэтому прочность и хладостойкость более однородного и мелкозернистого проката из спокойной стали выше, чем проката из кипящей ста-

ли. Но при затвердевании спокойной стали в изложницах образуется большая усадочная раковина, для удаления которой прибегают к обрезанию слитка ($12 \div 16$ % по массе). Вследствие этих потерь, а также дополнительных расходов, в том числе на ферросплавы и алюминий для раскисления, спокойная сталь дороже кипящей.

Существует сталь с промежуточной степенью раскисления — полуспокойная. В отличие от кипящей она обрабатывается перед разливкой небольшим количеством раскислителей.

По однородности химического состава, микроструктуры и механических свойств, по сопротивлению хрупкому разрушению и прочностным показателям прокат из полуспокойной стали уступает прокату из спокойной стали и занимает между ним и прокатом из кипящей стали промежуточное положение.

Основным преимуществом кипящей стали является высокий (более 95 %) выход годного. У полуспокойной стали, раскисляемой марганцем и в ковше кремнием, выход годного составляет около 90 %.

Глава 2

Назначение различных марок сталей и сплавов

Представленные ниже справочные данные дают представление о наиболее известных промышленных материалах и областях их практического использования. Однако они не охватывают все возможное многообразие применяемых в промышленности материалов, поэтому в последующих главах, касающихся рассмотрения ряда сплавов на основе железа и известных цветных металлах, будут обсуждаться некоторые металлические материалы, формально не отраженные в данной главе.

2.1. Конструкционные стали

| Примерное назначение материала | Рекомендуемые марки |
|--|---------------------|
| Стали, используемые без термической обработки или в отожженном (нормализованном) состоянии. Хорошая свариваемость | |
| Листы, штампуемые в холодном состоянии с глубокой вытяжкой | 08кп, 10кп |
| Заклепки, жесткие связи | Ст2, Ст3 |
| Водопроводные трубы | 10, 20 |
| Оси неответственного назначения | Ст5 |

| | |
|---|--|
| <p>Цементуемые стали</p> <p>Детали, не требующие высокой прочности сердцевины: зубчатые колеса, шестерни, пальцы шарниров, червяки, муфты, крюки, тяги</p> <p>Аналогичные детали более сложной формы, не чувствительные к перегреву при цементации</p> <p>Детали с высокой прочностью и вязкостью сердцевины, крупные сечения: шестерни, оси, валы</p> <p>Траки, шестерни с меньшей вязкостью сердцевины</p> | <p>15, 20, 15X, 20X</p> <p>15XA, 15XF</p> <p>12XH3A, 12X2H4A, 20XH</p> <p>18XГТ, 18XГ</p> |
| <p>Улучшаемые стали</p> <p>Стали, прокаливающиеся в сечениях до 15 мм. Оси, валы, штоки, шестерни, болты ответственного назначения</p> <p>Стали, прокаливающиеся в сечениях 25—30 мм. Коленчатые валы, оси, цапфы, вагонные оси, шатуны</p> <p>Оси, валы, шестерни, тонкостенные трубы, валы высокой прочности</p> <p>Стали, прокаливающиеся в сечениях 35—50 мм. Валы, шестерни, болты, шпильки ответственного назначения, цилиндры моторов</p> <p>Стали, прокаливающиеся в сечениях 50—100 мм. Валы, штоки, тяжело нагруженные валы, кривошипы высокой прочности</p> <p>Стали, упрочняемые поверхностной закалкой при индукционном нагреве</p> <p>Валы, оси, шестерни</p> <p>Аналогичные детали, но более крупных размеров</p> <p>Те же детали, но при повышенных напряжениях</p> | <p>35, 40, 45, 50</p> <p>35Г2, 45Г2</p> <p>35X, 40X, 45X, 30XM, 30XC, 20XГC, 40XC, 40XFА</p> <p>30XГCА, 35XM, 40XH, 40XГТР</p> <p>20X2H4A, 30XH3A, 40XHM, 38XH3MA</p> <p>35, 40, 55, 60</p> <p>45X, 50X</p> <p>58 (55ПП)</p> |

| | |
|--|---------------------------------|
| Строительные низколегированные стали | |
| Стойки ферм, обвязки вагонов, балки и другие детали вагоностроения, детали экскаваторов, элементы сварных металлоконструкций | 09Г2, 09Г2С |
| Сварные конструкции (корпуса сосудов, аппаратов, днища, фланцы и части паровых котлов), работающих под давлением, нефте- и газопроводы | 14Г2, 17ГС, 15ГФ |
| Конструкции эстакад, фермы, балки перекрытий, колонны, стойки, мосты для транспорта, судостроительные конструкции | 15Г2СФ, 14Г2АФ, 10ХСНД, 15ХСНД |
| Арматурные стержни | 20ГС2, 23Х2Г2Т |
| Стали повышенной обрабатываемости (автоматные стали) | |
| Оси, валики, втулки, шестерни, пальцы, винты, болты и другие малонагруженные мелкие детали сложной формы, обрабатываемые на станках-автоматах | А12, А20 |
| Оси, валики, втулки, шестерни, пальцы, винты, шестерни, болты, кольца и другие высоконагруженные детали сложной формы, обрабатываемые на станках-автоматах | А30, А40Г, АС40, АС30ХМ, АС35Г2 |
| Азотируемые стали | |
| Шпиндели быстроходных станков, стаканы цилиндров, шестерни, болты ответственного назначения | 38ХМЮА, 40ХНМА |
| Стали, применяемые в сельскохозяйственном машиностроении | |
| Лемехи, ножи, отвалы | 55С2, 65Г, У9 |
| Рамы | 10 |
| Пружинные стали | |
| Рессоры автомашин, пружины подвижного состава железнодорожного транспорта, пружины крупных прессов | 55С2, 65Г, 50ХГ |

| | |
|---|---------------------------|
| Пружины особо ответственного назначения | 50ХФА, 55ХГСФА |
| Пружины часовых механизмов | 70С2ХА |
| Коррозионно-стойкие пружины | 65Х13 |
| Стали для железнодорожного транспорта | |
| Рельсы железнодорожные | 76, 76Ф, 76Т |
| Цельнокатанные железнодорожные колеса и бандажи | 60ГФ |
| Автосцепные устройства | 20ГЛ |
| Стыковые соединения рельсов | 54 |
| Криогенные стали | |
| Резервуары для сжиженных газов с температурой до $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ | ОН6 |
| Изделия, работающие при температурах до $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ | ОН9, 12Х18Н9Т, 03Х13АГ19 |
| Те же с рабочей температурой до $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 08Х18Н10Т, 03Х20Н16АГ6 |
| Подшипниковые стали | |
| Шарики, ролики, кольца широко- и роликоподшипников, плунжера, втулки, корпуса распределителей, нагнетательные клапаны | ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ, ШХ4 |
| Те же для работы в агрессивных средах | 95Х18Ш, 11Х18ВД |
| Те же для работы при температурах до $500\div 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 8Х4В9Ф2Ш, 8Х4М4Ф1Ш |

2.2. Инструментальные стали

| | |
|---|---------------------|
| Стали нетеплостойкие повышенной вязкости | |
| Пневматические долота, зубила, топоры, молотки по дереву и металлу, шаблоны | У7, У7А, 7ХФ |
| Чеканочные штампы | 6ХЗФС |
| Стали нетеплостойкие повышенной твердости | |
| Штампы высадочные, вытяжные, метчики для резания мягких материалов | У10, У10А, У12, У13 |
| Штампы вытяжные, резьбовые калибры, лекала сложной формы | Х(ШХ15) |
| Круглые плашки, пилы по дереву, сверла, резцы для обработки латуней (рабочие температуры до 200 °С) | ХВСГ, 9ХФ, 9ХС |
| Штампы для холодной штамповки | ХГС, ХГСФВ, ХГЗСВ |
| Штампы для холодной штамповки | Х12Ф, Х12Ф1, Х12М |
| Стали теплостойкие повышенной твердости | |
| Штампы вырубные, вытяжные, для чеканки медных сплавов, матрицы прессования, фильеры | Х12Ф1, Х12М |
| Инструмент такого же типа, но стойкий против коррозии | Х18МФ |
| Стали повышенной вязкости | |
| Крупные молотовые штампы для горячей штамповки | 5ХНВ, 5ХНМ |
| Крупные молотовые штампы, работающие при более высоком нагреве | 3Х2НМВФ |
| Штамповые стали повышенной вязкости: | |
| <ul style="list-style-type: none"> с умеренной теплостойкостью: штампы, формы литья под давлением; | 4Х5МФС, 4Х5В2ФС |

| | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • с повышенной теплостойкостью: пуансоны выдавливания и прошивные; • с высокой теплостойкостью: пуансоны выдавливания, кольца, накатники для деформирования металла при температурах до $650 \div 750$ °С. | 3X2B8, 4X3BФ2M2 5X3B3MФ 2X8B8M2K8 |
| Быстрорежущие стали высокой твердости: | |
| <ul style="list-style-type: none"> • умеренной теплостойкости: протяжки, фрезы, сверла, метчики, резцы, долбяки; • повышенной теплостойкости: развертки, протяжки для обработки конструкционных сталей; • для резания жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов. | P6M5, P9, P12, P18 P12Ф3 P12Ф4K5 P8M3K6C |
| Твердые сплавы | |
| Точение чугуна чистовое непрерывное | BK3 |
| Точение чугуна, цветных металлов чистовое прерывистое и черновое непрерывное | BK6 |
| Обработка аустенитных сталей, твердых чугунов, бурение горных пород | BK6-М, BK6-В |
| Бурение горных пород, волочение стали | BK15 |
| Чистовое точение (непрерывное), фрезерование сталей | T15K6, T5K10 |
| Штампы при повышенном износе и небольших ударных нагрузках | BK20 |
| Штампы при больших ударных нагрузках | BK25 |

2.3. Чугуны

| | |
|---|---|
| <p>Серые чугуны</p> <p>Детали неответственного назначения: крышки, шкивы</p> <p>Станины станков и механизмов, поршни, цилиндры</p> <p>Детали, работающие на износ: тормозные барабаны, цилиндры, шестерни</p> <p>Ковкие чугуны</p> <p>Тормозные колодки, фланцы, муфты</p> <p>Задний мост, картер автомобиля, ступицы</p> <p>Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом</p> <p>Траверсы прессов, фланцы, цилиндры, шестерни</p> <p>Поршни, цилиндры</p> <p>Прокатные валки, рабочие части размольного оборудования, колеса неответственного назна- чения</p> | <p>СЧ12, СЧ15 (ферритная основа)</p> <p>СЧ18, СЧ20 (феррито-перлитная основа)</p> <p>СЧ25, СЧ30, СЧ35 (перлитная основа)</p> <p>КЧ35-10, КЧ37-12 (ферритная основа)</p> <p>КЧ45-7 (феррито-перлитная основа)</p> <p>ВЧ50 (ферритная основа)</p> <p>ВЧ80 (перлитная основа)</p> <p>Отбеленный чугун (на поверх- ности цементит и перлит, НВ 300÷450)</p> |
|---|---|

2.4. Жаростойкие, жаропрочные, коррозионно-стойкие и износостойкие стали и сплавы

| | |
|--|--------------------|
| Жаростойкие стали и сплавы | |
| Детали котельных установок, трубы, работающие при температурах до 450 °С, 600° С | X5 X6CM |
| Клапаны выпуска автомобильных и тракторных двигателей | 4X9C2 |
| Клапаны выпуска поршневых двигателей | 30X30H7C2 |
| Трубы пиролизных установок | 15X28 |
| Печные конвейеры, цепи, трубы, листы | 20X20H14C2 |
| Жаропрочные стали и сплавы | |
| 1. Рабочая температура до 550 °С | |
| Трубы, арматура паровых котлов | 15XM, 12X1M1Ф |
| Трубы нефтяных установок, стойкие против водородной коррозии | 20X3MBФ |
| 2. Рабочая температура до 600 °С | |
| Аппаратура переработки нефти, детали насосов, клапаны двигателей | X5M, X6CM, 4X10C2M |
| Лопатки паровых турбин | 0X13, 20X12BM |
| Трубы, детали печной арматуры, теплообменники, муфели | 12X18H10T |
| 3. Рабочая температура выше 600 °С | |
| Клапаны для работы до 650 °С | 40X14H14B2M |
| Лопатки, диски для работы до 750 °С | XH77TЮР |
| Лопатки турбокомпрессора для работы до 850 °С | XH56BMКЮ |

| | |
|--|--------------------------|
| Рабочие и сопловые лопатки турбин высокого давления авиационных газотурбинных двигателей для работы до 1150 °С | ЖС6, ЖС6К, ЖС26, ЖС32 |
| Коррозионно-стойкие стали | |
| Лопатки турбин, арматура крегинг-установок | 12Х13 |
| Хирургические инструменты, иглы | 40Х13, 95Х18 |
| Баки, трубы, устойчивые в морской воде (хорошая свариваемость) | 12Х18Н10Т |
| Износостойкие стали | |
| 1. В условиях кавитационной эрозии | |
| Лопасты гидротурбин и гидронасосов | 30Х10Г10 |
| Гребные винты, лопасти гидротурбин, стойкие в морской воде | 08Х14АГ12М |
| 2. В условиях ударно-абразивного изнашивания | |
| Щеки и бронефутеровки камнедробилок, шары, траки гусеничных машин, крестовины железнодорожных рельсов | 110Г13Л |
| 3. В условиях ударного и коррозионно-абразивного изнашивания | |
| Насосы для перекачки кислотных растворов | ЧХ260Х17М3 ЧХ250Х28Н2 |
| Мартенситностареющие стали особо высокой прочности и вязкости | |
| Баки, трубы криогенного назначения, детали самолетов | 03Н18К9М5Т |
| Детали химической аппаратуры | 08Х12Н10Д2Т |
| Пружины | 03Х12Н8К5М2ТЮ |

2.5. Цветные сплавы

| | |
|---|--|
| <p>Подшипниковые сплавы</p> <p>Мягкие антифрикционные сплавы (для заливки вкладышей подшипников скольжения)</p> <p>Простые латуни</p> <p>Листы, ленты, трубы</p> <p>Ювелирные и декоративные изделия</p> <p>Те же детали, но пластичность ниже, а обрабатываемость резанием выше</p> <p>Специальные латуни, стойкие против коррозии</p> <p>Массивное литье в судостроении</p> <p>Литые шестерни, зубчатые колеса</p> <p>Отливки в морском и общем машиностроении</p> <p>Бронзы</p> <p>Шестерни, втулки, подшипники</p> <p>Арматура и шестерни для работы в морской воде</p> <p>То же при работе в условиях большого давления и трения</p> <p>Высокопрочные и токоведущие пружины, мембраны, сильфоны, упругие контакты</p> <p>Полосы для производства монет</p> <p>Пружины, скользящие контакты</p> | <p>Оловянные баббиты: Б83, Б88</p> <p>Свинцовые баббиты: БС, Б6</p> <p>Л96, Л80, Л68 («патронная»)</p> <p>Л90 («томпак»)</p> <p>ЛС59-1</p> <p>ЛМцЖ55-3-1</p> <p>ЛМцОС58-2-2-2</p> <p>ЛА67-2,5</p> <p>БрОЦ10-2, БрС30, БрО10 Ф1</p> <p>БрАЖ9-4</p> <p>БрАЖН10-4-4</p> <p>БрБ2, БрБНТ1,7</p> <p>БрА5</p> <p>БрА7</p> |
|---|--|

| | |
|--|---|
| <p>Медноникелевые сплавы</p> <p>Медицинский инструмент, разменная монета, наградные изделия Художественные изделия, столовые приборы, плоские пружины, паровая и водяная арматура Полосы для изготовления пружин и других изделий в электротехнике</p> | <p>МН19 (мельхиор)</p> <p>МНЦ15-20 (нейзильбер)</p> <p>МНА6—1,5 (куниаль)</p> |
| <p>Алюминиевые сплавы</p> <p>1. Деформируемые, упрочняемые термообработкой Лонжероны самолетов, лопасти Трубы, прутки, заклепки повышенной прочности</p> <p>2. Деформируемые, не упрочняемые термообработкой Поршни двигателей, кольца, лопасти компрессора Сварные баки, трубопроводы Бензино- и маслопроводы, баки сварные</p> <p>3. Литейные сплавы Детали колес, агрегатов и приборов малой нагруженности Детали тонкостенные и сложной формы небольшой и средней нагруженности</p> | <p>В95 Д16, Д18</p> <p>АК2, АК4 АМг2 АМц, АМг6</p> <p>АЛ2</p> <p>АЛ7, АЛ9</p> |
| <p>Магниеые сплавы</p> <p>Арматура, детали корпусов насосов, ручки, педали Теплостойкие, для работы до 250 °С Теплостойкие, для работы до 400 °С</p> | <p>МЛ3, МЛ5 МЛ10 МЛ15</p> |
| <p>Титановые сплавы</p> <p>Высокая пластичность и прочность до 1200 МПа при 20 °С</p> <p>С повышенной стойкостью против коррозии</p> <p>С хорошей пластичностью и прочностью до 900 МПа</p> <p>С высокой свариваемостью, хорошей пластичностью и прочностью при низких температурах</p> | <p>ВТ15</p> <p>ВТ8, ВТ3</p> <p>ВТ6</p> <p>ВТ5</p> |

Глава 3

Выбор стальных и чугунных материалов с использованием справочных данных

И зложенные выше справочные данные позволяют получить предварительные сведения о номенклатуре основных металлических материалов и областях их технического использования. Тем самым пользователю можно уже определенным образом сориентироваться по поводу того, для каких практических нужд и какой именно материал представляется наиболее предпочтительным в данных обстоятельствах.

Следующим шагом изыскания нужных материалов и технологий является достаточно традиционный прием — это использование более детальных технических сведений, заимствованных из соответствующих библиографических источников (монографий, специальных справочников, учебной литературы, результатов интернетовских поисков). При этом нужно исходить из очевидного постулата — не всегда удастся получить однозначное и простое решение, поскольку при выборе марки материала необходимо обеспечить в первую очередь показатели прочности, надежности и долговечности детали; кроме того, следует учитывать технологию изготовления, экономию материала, специфические условия службы детали (температура, среда, скорость нагружения и т. п.).

В данной главе рассматриваются практические примеры решения наиболее характерных задач по выбору потребного материала и технологии его обработки. Основное внимание будет уделено классическим типам металлических материалов — конструкционных и инструментальных.

3.1. Выбор марки конструкционной стали и технологического режима ее упрочняющей обработки для типовых деталей машин

При выборе сталей исходят из общих эксплуатационных, технологических и экономических требований к деталям машин и конструкциям. При этом соображения экономической целесообразности, связанные с выбором материала и его технологической обработки, должны быть учтены при решении подобной инженерной задачи.

Как было сказано, конструкционными называют материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, приборов или конструкций, подвергающиеся механическим нагрузкам. Они могут работать в условиях статических, циклических и ударных нагружений, при низких и высоких температурах, в контакте с различными средами. Эти факторы определяют требования к конструкционным материалам, основные из которых — это эксплуатационные, технологические и экономические.

3.1.1. Рекомендации по выбору марки стали и технологии ее упрочняющей обработки

В качестве примера рассмотрим достаточно типичный случай, когда надлежит подобрать, с одной стороны, обоснованный вариант марки конструкционной стали, а с другой, назначить наиболее приемлемый режим термической обработки, гарантирующие в целом получение требуемых эксплуатационных свойств рассматриваемого изделия.

3.1.2. Выбор марки стали по критическому диаметру прокаливаемости

Главными параметрами, определяющими выбор стали, являются *механические свойства и распределение их по сечению детали*. Оптимального сочетания прочности, пластичности и ударной вязкости достигают после термического улучшения при сквозной прокаливаемости. При полной прокаливаемости механические свойства стали мало за-

висят от ее легирования. Исключение составляет легирование никелем и молибденом, повышающее сопротивление хрупкому разрушению. Не следует стремиться к излишне высокой прокаливаемости за счет легирования стали хромом, марганцем и кремнием, так как при этом возрастает склонность стали к хрупкому разрушению.

Глубоко прокаливающиеся стали применяют для крупных деталей с большим сечением. Для деталей, испытывающих растягивающие напряжения (шатун, торсионные валы, ответственные болты и др.), а также для рессор и пружин нужно обеспечивать полную прокаливаемость.

Под прокаливаемостью понимают способность стали получать закаленный слой с мартенситной или трооститно-мартенситной структурой и высокой твердостью на ту или иную глубину. Если закаленный слой характеризуется только структурой мартенсита, то такую прокаливаемость называют мартенситной. Однако в связи с трудностью определения границы чисто мартенситной структуры чаще определяют границу слоя, содержащего не только мартенсит, но и некоторое количество промежуточных или трооститных структур. Например, обычно при оценке мартенситной прокаливаемости используют глубину слоя с содержанием мартенсита 95 %. Но чаще всего определяют не мартенситную, а полумартенситную прокаливаемость, оцениваемую расстоянием от поверхности до полумартенситной зоны (50 % мартенсита + 50 % троостита). Полумартенситную зону принимают в качестве критерия прокаливаемости потому, что ее легко определить по микроструктуре, но еще проще по твердости. Твердость полумартенситной структуры в основном зависит от содержания углерода и слабее от легирования сталей (табл. 3.1).

Таблица 3.1

**Влияние содержания углерода и легирования сталей
на твердость полумартенситной зоны**

| Содержание углерода, мас. % | Твердость (HRC) полумартенситной зоны сталей | |
|-----------------------------|--|--------------|
| | углеродистых | легированных |
| 0,08÷0,17 | — | 25 |
| 0,18÷0,22 | 25 | 30 |
| 0,23÷0,27 | 30 | 35 |
| 0,28÷0,32 | 35 | 40 |
| 0,33÷0,42 | 40 | 45 |
| 0,43÷0,52 | 45 | 50 |
| 0,53÷0,62 | 50 | 55 |

Прокаливаемость количественно оценивают по реальному критическому диаметру. *Реальным критическим диаметром называют наибольший диаметр образца, при котором сталь в данном охладителе (в воде, в масле, на воздухе и т. д.) прокаливается полностью, т. е. в центре образца будут обеспечены необходимые структура и твердость.*

Прокаливаемость определяется *критической скоростью охлаждения*, зависящей от состава стали. Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия будет превышать критическую скорость заковки $V_{кр}$, то сталь получит мартенситную структуру по всему сечению; если же будет превышена скорость охлаждения для полумартенситной зоны $V_{кр50}$, то обеспечивается сквозная полумартенситная прокаливаемость. При недостаточной скорости охлаждения в сердцевине изделия (меньшей $V_{кр}$ и меньшей $V_{кр50}$) изделие прокалится только на некоторую глубину и прокаливаемость будет неполной. В этом случае в сердцевине произойдет распад аустенита с образованием пластинчатой ферритно-карбидной структуры (троостита, сорбита или перлита).

Прокаливаемость стали тем выше, чем меньше критическая скорость заковки, т. е. чем выше устойчивость переохлажденного аустенита. Она увеличивается при легировании стали элементами, хорошо растворяющимися в аустените (кроме кобальта), а также при увеличении содержания углерода до 0,8 %. Сильно повышают прокаливаемость молибден, вольфрам, хром, марганец и малые добавки бора (0,003÷0,005 %), менее сильно влияет кремний. Прокаливаемость особенно возрастает при введении в сталь нескольких легирующих элементов.

Легирующие элементы повышают прокаливаемость, только когда они растворены в аустените. Если же они находятся в виде химических соединений (например, карбидов или нитридов), то они не только не повышают устойчивость аустенита, но могут ее уменьшить, так как частицы карбидов и нитридов служат готовыми зародышами, облегчающими распад аустенита.

Прокаливаемость зависит также от *размеров детали и скорости охлаждения*. Чем интенсивнее охлаждает закалочная среда, тем больше прокаливаемость.

При сквозной прокаливаемости свойства стали (в том числе и твердость) по всему сечению изделия одинаковы или мало различаются. При несквозной прокаливаемости твердость падает от поверхности к сердцевине.

После отпуска при высокой температуре различие в твердости и временном сопротивлении по сечению уменьшается, однако предел текучести, пластичность и особенно ударная вязкость в сердцевине образца остаются более низкими. Это объясняется, как ранее отмечалось, разным характером строения ферритно-цементитной структуры. В закаленном слое в результате отпуска мартенсита образуется более дисперсная ферритно-цементитная смесь зернистого строения, а в сердцевине она более грубая и имеет пластинчатое строение.

Прокаливаемость стали является важным фактором, определяющим свойства и применение сталей. Чем больше прокаливаемость, тем легче получить высокие механические свойства стали после термической обработки даже в деталях большого сечения. Это особенно важно для ответственных деталей, которые подвергают термическому улучшению, т. е. закалке и высокому отпуску. Поэтому такие детали целесообразно изготавливать из легированных сталей, обладающих высокой прокаливаемостью.

Стали высокой прокаливаемости обладают еще и тем преимуществом, что их можно закаливать в масле и даже на воздухе, что способствует уменьшению внутренних напряжений, возникающих при закалке.

При выборе конструкционных сталей для деталей ответственного назначения во многих случаях применим *критерий минимально достаточного легирования: количество легирующих элементов в стали должно быть достаточным для обеспечения сквозной прокаливаемости детали в наибольшем рабочем сечении, но не превышающим этого уровня.*

Выбор марки стали для деталей машин производится пошагово в следующей логической последовательности действий:

- анализ условий работы заданной детали и особенностей ее конструкции;
- предварительный выбор марок сталей, удовлетворяющих требуемым условиям;
- сравнительный анализ выбранных марок сталей (по механическим свойствам с учетом прокаливаемости) и окончательный выбор материала с учетом его эксплуатационных и технологических характеристик и стоимости;
- выбор вида и режима термической или химико-термической обработки детали, обеспечивающих соответствие комплекса свойств выбранного материала требуемым условиям.

Предварительный выбор марки стали проводят с использованием приведенных выше рекомендаций или справочных данных. Проверку соответствия выбранной марки стали принятому распределению твердости по сечению детали выполняют с учетом прокаливаемости стали.

3.1.3. Стоимость металлических сплавов

Стоимость материала определяет промышленную возможность и экономическую целесообразность применения требуемого материала. Поэтому полезно знать относительные стоимостные показатели разных металлов, что определенным образом позволяет ориентироваться в цене и сплавов на их основе. В табл. 3.2 (данные А. П. Гуляева) приведена относительная стоимость наиболее известных металлов. За исходный показатель (равный единице) принята стоимость железа, точнее простой углеродистой стали. Представленные данные носят достаточно примерный характер, поскольку не учитывают конъюнктурные обстоятельства, ни вид полуфабриката, ни степень чистоты металла, однако дают возможность, тем не менее, приблизительно оценить стоимость разных материалов.

Если же говорить более конкретно применительно к конструкционным материалам на основе железа, то и в этом случае удобно пользоваться относительными показателями.

Таблица 3.2

Относительная стоимость металла

| Металл | Относительная стоимость | Металл | Относительная стоимость |
|----------|-------------------------|----------|-------------------------|
| Железо | 1 | Вольфрам | 75 |
| Свинец | 2,5 | Титан | 160 |
| Цинк | 3 | Молибден | 170 |
| Алюминий | 6 | Серебро | 290 |
| Медь | 7,5 | Ванадий | 750 |
| Магний | 8 | Тантал | 800 |
| Марганец | 10 | Ниобий | 800 |
| Никель | 17 | Палладий | 5000 |
| Олово | 22 | Золото | 11000 |
| Хром | 25 | Рений | 12000 |
| Кобальт | 35 | Иридий | 25000 |
| Висмут | 50 | Осмий | 25000 |
| | | Платина | 27000 |

В качестве эталона с относительной ценой (ОЦ), равной 1, принято использовать прокат сортовой круглого и квадратного сечения из углеродистых сталей обыкновенного качества, представляющий собой наиболее дешевые заготовки. Цена стальных заготовок определяется не только маркой стали, но и сортаментом заготовок. Наиболее высокая цена соответствует тонколистовой стали (толщиной $1,0 \div 1,4$ мм). Строительная сталь, предназначенная для армирования железобетонных конструкций (диаметром $12 \div 14$ мм), сравнительно дешева и имеет относительную цену $1,04 \div 1,05$ (здесь и далее по данным Г. И. Сильмана).

Мало отличается по стоимости от сталей обыкновенного качества сортовая качественная кипящая и полуспокойная сталь (марок 08кп \div 20кп, 08пс \div 25пс), поставляемая по относительной цене $1 \div 1,1$. Качественная спокойная сортовая углеродистая и марганцевая стали отличаются более высокой стоимостью (ОЦ до 1,2). Чем больше размеры сортового проката, тем ниже его стоимость.

Стоимость легированной стали зависит от химического состава, типа полуфабриката и его размеров (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Относительные цены на стальной прокат

| Вид и марка стали | Полуфабрикат, мм | Относительная цена |
|---|--|--------------------|
| Углеродистая обыкновенного качества: Ст1 \div Ст7, БСт1 \div БСт6, ВСт1 \div ВСт5 | Сортовой круглый и квадратный размером 16 \div 19 | 1,0 |
| | Гнутые профили (угольники, швеллеры и др.) | 1,10 \div 1,15 |
| | Листовой прокат | 1,03 \div 1,24 |
| Углеродистая качественная: 08 \div 85 | Сортовой прокат размером 8 \div 250 | 1,0 \div 1,17 |
| Низколегированная сталь: 14 Г2, 17 ГС, 15ХСНД, 16 Г2 АФ и др. | Сортовой прокат (20 \div 30) | 1,03 \div 1,59 |
| | Швеллеры (10 \div 14) | 1,04 \div 1,59 |
| | Гнутые профили (толщиной 2,0 \div 2,8) | 1,23 \div 1,30 |
| | Балки двутавровые (номеров 16 \div 22) | 1,02 \div 1,56 |
| | Листы толщиной 1 \div 12 | 1,10–2,02 |
| Автоматная сталь: А12, А20, А30, А40 | Сортовой прокат (10 \div 80) | 1,16 \div 1,30 |
| | Калиброванный прокат (3 \div 100) | 1,25 \div 1,95 |
| Хромистые стали: 15Х, 20Х 40Х | Сортовой прокат (8 \div 250) | 1,12 \div 1,30 |

Окончание табл. 3.3

| Вид и марка стали | Полуфабрикат, мм | Относительная цена |
|---|---|---|
| Хромованадиевые стали: 15ХФ, 20ХФ | Сортовой прокат (8÷250) | 1,38÷1,57 |
| Легированные стали: 18ХГ, 30ХГТ и др. | Сортовой прокат | 1,17÷1,47 |
| Легированная сталь: 40ХГНР | Сортовой прокат (8÷100) | 1,70÷1,83 |
| Хромансил: 30ХГС и др. | Сортовой прокат (8÷250) Калиброванный прокат (51÷100) | 1,38÷1,56 1,65÷2,10 |
| Хромоникелевые стали: 30ХН | Сортовой прокат (8÷250) Калиброванный прокат (5÷49) | 1,62÷1,78 2,21÷2,7 |
| 30ХН3А | Сортовой прокат (8÷250) Калиброванный прокат (5÷49) | 2,31÷2,56 2,78÷3,30 |
| Сложнолегированные стали: 40ХНМА | Сортовой прокат (8÷250) Калиброванный прокат (5÷49) | 2,14÷2,35 2,65÷3,30 |
| 40ХНВА | Сортовой прокат (8÷250) Калиброванный прокат (5÷49) | 2,60÷2,85 4,05÷4,80 |
| 38Х2МЮА | Сортовой прокат (8÷250) Калиброванный прокат (5÷49) | 2,00÷2,15 2,43÷3,02 |
| Шарикоподшипниковые стали: ШХ4, ШХ15, ШХ15СГ и др. | Сортовой прокат (12÷200) Проволока (1,4÷8,0) Калиброванный прокат (9÷49) | 1,46÷1,67 3,05÷5,60 2,10÷2,70 |
| Рессорно-пружинные стали: 65÷85 55 С2 70 С3 А 50ХФА 60 С2ХФА 65 С2 ВА 60 С2 Н2 А | Сортовой прокат (8÷200) Сортовой прокат (3÷49) Сортовой прокат (16÷100) | 1,00÷1,17 1,30÷1,40 1,44÷1,52 1,63÷1,71 2,07÷3,00 3,10÷4,03 2,00÷2,10 |

Низколегированные стали, содержащие сравнительно недорогие элементы (Si, Mn), по стоимости близки к углеродистым сталям. Более высокую стоимость имеют стали, содержащие Ni, Cr, V. Наиболее дорогостоящими являются стали, легированные W, Mo и Co.

Экономическая целесообразность применения легированных сталей определяется уровнем их свойств и стоимостью. В табл. 3.4 приведе-

на ориентировочная оценка коэффициентов экономичности использования некоторых низколегированных сталей. В качестве критерия такой оценки использовано изменение предела текучести для условий статического нагружения и изменение предела выносливости при циклическом нагружении.

В представленной выше табл. 3.3 указаны виды продукции в виде полуфабрикатов, полученных путем горячего деформирования стальных заготовок на специальных агрегатах — прокатных станах. Дадим краткие пояснения.

Таблица 3.4

**Оценка экономической целесообразности использования
некоторых легированных сталей**

| Марка стали | Относительное повышение цены на сталь (a) | Относительное повышение предела текучести (b) | Относительное изменение предела выносливости (v) | Коэффициенты экономической эффективности | |
|-------------|---|---|--|--|-----------------------------------|
| | | | | по пределу текучести (b/a) | по пределу выносливости (v/a) |
| Ст3 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 09Г2С | 1,13 | 1,38 | 0,89 | 1,22 | 0,79 |
| 10Г2С1 | 1,16 | 1,50 | 0,91 | 1,29 | 0,79 |
| 14Г2 | 1,10 | 1,38 | 1,0 | 1,24 | 0,91 |
| 17ГС | 1,10 | 1,33 | 1,14 | 1,21 | 1,04 |
| 10ХСНД | 1,62 | 1,67 | 1,0 | 1,03 | 0,62 |
| 15ХСНД | 1,45 | 1,47 | 1,05 | 1,02 | 0,73 |
| 16Г2АФ | 1,30 | 1,80 | 1,32 | 1,38 | 1,02 |
| 18Г2АФ | 1,30 | 1,80 | 1,37 | 1,38 | 1,06 |
| 12ХН2 | 2,00 | 2,20 | 1,30 | 1,10 | 0,65 |
| 18Х2Н4М | 3,11 | 3,50 | 2,16 | 1,12 | 0,69 |
| 20ХН3А | 2,40 | 3,40 | 1,55 | 1,41 | 0,65 |
| 20ХГСА | 1,53 | 2,20 | 1,33 | 1,44 | 0,87 |
| 30ХГСА | 1,50 | 2,40 | 1,65 | 1,60 | 1,10 |

Принято различать два вида прокатного производства, что основывается на геометрии выпускаемой продукции. Для получения проката в форме стального листа или рулонов листовой стали применяют *листпрокатные станы*. Они имеют гладкие валки (рис. 3.1, *а*). Если нужно получить сортовую продукцию, т. е. в виде рельсов, балок различных профилей, прутков, штанг, то используются *сортпрокатные станы*.

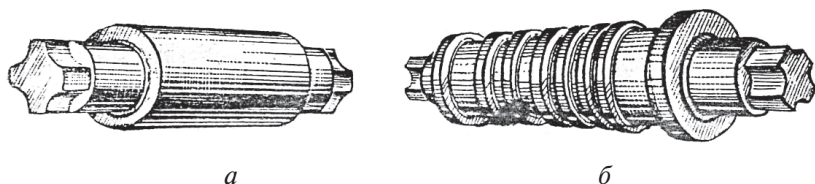


Рис. 3.1. Валки для листового (а) и профилированного (б) проката

Для получения изделий, сечение которых имеет форму круга, квадрата, уголка или рельса, на валках вытачивают вырезы (*ручьи*) требуемого профиля (рис. 3.1, б). Ручьи на верхнем и нижнем валках, расположенные на одной оси, образуют калибр, форму которого приобретает прокатываемый металл. Такие валки называются *калиброванными* или *ручьевыми*. Исходная заготовка, проходя через ряд последовательно расположенных калибров, постепенно приобретает форму и размеры готового изделия.

На рис. 3.2 представлен характерный сортамент такой продукции.

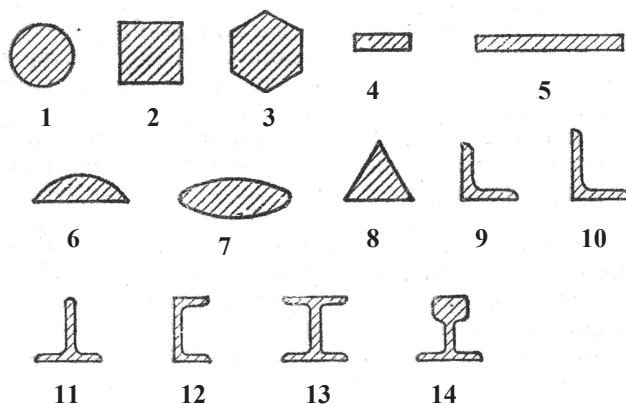


Рис. 3.2. Сортамент прокатной продукции:

- 1 — круг; 2 — квадрат; 3 — шестигранник; 4 — полоса; 5 — лист; 6 — сегмент; 7 — овал;
8 — трехгранник; 9 — равнобокий уголок; 10 — неравнобокий уголок; 11 — тавровая балка;
12 — швеллер; 13 — двутавровая балка; 14 — рельс

3.1.4. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из конструкционных сталей

Рассмотрим конкретный случай, в котором выбор нужной марки стали обосновывается величиной критического диаметра прокаливаемости.

Выберем марку стали для ведущей задней полуоси автомобиля «Волга-3102» диаметром 32 мм и длиной 640 мм, учитывая, что шлицевая часть на конце работает в условиях изнашивания.

Решение. В соответствии с рекомендациями, высоконагруженные валы целесообразно изготавливать из легированных сталей. Шлицевые валы должны обладать контактной выносливостью, высокой поверхностной твердостью (не менее 48 HRC) и износостойкостью.

Для изготовления таких деталей можно предложить, например, стали 40X, 40XГТ, 35XГС, поскольку более дорогие хромоникелевые стали 40XH и 40XHMA рекомендуют использовать для осей и валов большого диаметра. Поэтому рассмотрим три наиболее простых и экономичных варианта — хромистую и хромомарганцевые стали 40X, 40XГТ, 35XГС.

Видно, что сталь 40X не обеспечивает сквозную прокаливаемость вала диаметром 32 мм (см. с. 26).

По табл. 3.1 определяем твердость полумартенситной зоны для легированной стали с $0,33 \div 0,42\%$ С. Она составляет 45 HRC, что соответствует лимитируемой твердости улучшаемой стали в сердцевине детали. По средней линии полосы прокаливаемости стали 40X [7] определяем расстояние до зоны с твердостью 45 HRC (примерно 10 мм). По номограмме прокаливаемости [1, 2] находим критический диаметр $d_{кр}$ при охлаждении в минеральном масле и отношении $l/d = 20$ (где l — длина вала), он составляет 29 мм. *Реальным критическим диаметром называют наибольший диаметр образца, при котором сталь в данном охладителе (в воде, в масле, на воздухе и т. д.) прокаливается полностью, т. е. в центре образца будут обеспечены необходимые структура и твердость.*

Зная требуемую твердость сердцевины, по кривой или полосе прокаливаемости данной марки стали находим расстояние от закаливаемого торца до полумартенситной зоны (параметр прокаливаемости) h , мм. По величине h с помощью номограммы прокаливаемости определяем критические диаметры прокаливаемости для той среды, в которой проводится охлаждение выбранной стали. Если для стали нет кривой или полосы прокаливаемости, то можно пользоваться математической моделью прокаливаемости сталей (формула Сильмана-Серпик):

$$h = 2 C [1 + (Si^2 + Al^2 + Cu^2) + 7 Mn^2 + 10 Cr^2 + 10 V^2 + 3Ni^2 + 50 Mo^2 + 0,5 (Si + Al) (Mn + Ni) + 3 (Si + Al)Cr + Mn (Ni + Mo) + Ni (Cr + Mo) + 2 CuCr + 10 CrV],$$

где h — параметр прокаливаемости, мм; C, Si, Al, Cu, Mn, Cr, V, Ni, Mo — содержание соответствующих химических элементов, %.

В связи с этим рассмотрим второй вариант — стали 40ХГТ и 35ХГС. Для этих сталей полосы прокаливаемости в справочной и научной литературе не приведены. Поэтому определим параметр прокаливаемости по приведенной выше формуле для среднего химического состава сталей 0,4 % C : 0,27 — Si; 1,0 — Mn; 1,15 — Cr; 0,15 — Cu, 0,15 — Ni, 0,04 — Ti для стали 40ХГТ и 0,35 — C, 1,25 — Si, 0,85 — Mn, 1,2 — Cr, 0,15 — Ni для стали 35ХГС. По расчету получаем для стали 40ХГТ $h = 17,5$ мм, а для стали 35ХГС $h = 17,3$ мм и из номограммы прокаливаемости находим (для условий охлаждения в минеральном масле при $l/d = 20$) $d_{кр} = 45$ мм для стали 40ХГТ и $d_{кр} = 42$ мм для 35ХГС, что обеспечивает сквозную прокаливаемость полуоси при использовании обеих марок стали.

С учетом технико-экономических соображений выбираем для ведущей задней полуоси автомобиля «Волга-3102» сталь марки 35ХГС.

Свойства стали 35ХГС в термоулучшенном состоянии (закалка в масле от температуры 880 °С, отпуск при температуре 550 °С, охлаждение в воде): $\sigma_{0,2}$ не менее 870 МПа, σ_B не менее 1030 МПа, КСУ не менее 60 Дж/см², что отвечает требованиям по механическим свойствам. Твердость стали 35ХГС в улучшенном состоянии при сквозной прокаливаемости составляет 280÷310 НВ.

Для получения повышенной твердости (более 48 HRC) в шлицевой части полуоси ее можно подвергнуть поверхностной закалке с индукционным нагревом и самоотпуском, обеспечивая толщину закаленного слоя 1,5÷2,0 мм.

Таким образом, выбор стали 35ХГС в улучшенном состоянии для указанной полуоси с использованием критерия *минимально достаточного легирования* следует считать оптимальным, поскольку этот выбор удовлетворяет требованию обеспечения высокой конструкционной прочности изделия. Избыточное легирование, например хромом, никелем или молибденом, не обеспечит заметного улучшения механических свойств, однако, помимо увеличения стоимости материала полуоси, ухудшит ее обрабатываемость резанием и шлифуемость.

Для изделий, от которых требуются высокая ударная вязкость и низкий порог хладноломкости (работающих при низких температурах с высокими скоростями приложения нагрузки, особенно при наличии концентраторов напряжений), следует применять наследственно

мелкозернистые спокойные высококачественные стали, предпочтительно легированные никелем и молибденом.

3.2. Принципы выбора инструментальных сталей и технологий их упрочняющих обработок

Основными материалами, используемыми для изготовления разнообразных инструментов, являются инструментальные стали. В силу специфических условий работы к таким материалам, помимо свойств, присущих конструкционным сталям, предъявляются свои, особые требования. Так, характерным условием работы инструментов (особенно режущих и штамповых) являются высокие контактные давления на рабочую кромку, вызывающие их очевидное изнашивание. При этом в большинстве случаев наблюдается сильный разогрев контактной поверхности (порой до нескольких сот градусов). Уже это упоминание специфики работы инструментальных материалов говорит о том, что с учетом особенностей эксплуатации они должны отличаться набором специальных свойств, что позволяет выделить их в особый класс металлических материалов — *инструментальные стали и сплавы*.

3.2.1. Классификация, маркировка и принципы выбора инструментальных сталей

Напомним, что *инструментальными называют стали, обладающие высокими твердостью (как правило, $60 \div 65$ HRC), прочностью и износостойкостью и применяемые для изготовления различного инструмента*.

Отсюда следует, что *основным критерием выбора инструментальных сталей является их закаливаемость, т. е. способность приобретать при закалке на мартенсит высокую твердость*. Поскольку содержание углерода служит основным средством, определяющим структуру, твердость и механические свойства углеродистых сталей в связи с увеличением количества перлита, то износостойкость в отожженном и особенно в закаленном состояниях имеет сильно выраженную зависимость от концентрации углерода (рис. 3.3). Крутая восходящая зависимость твердости закаленной стали от содержания углерода до 0,7 % сменяется

практически насыщением твердости выше этой концентрации углерода. Таким образом, к износостойким относятся стали, соответствующие требованию высокой исходной твердости (и прочности), прежде всего инструментальные и подшипниковые. Обычно это заэвтектоидные стали или стали близкого к эвтектоидному состава, структура которых после закалки

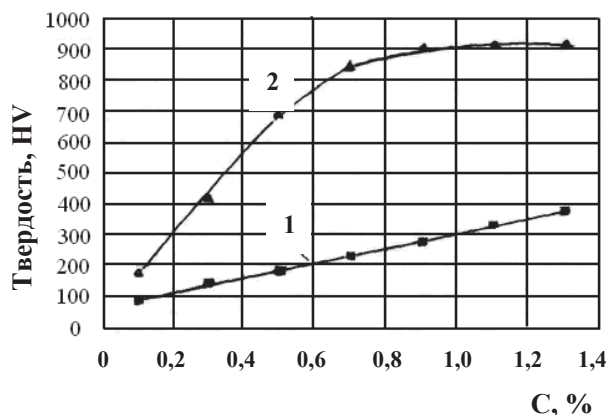


Рис. 3.3. Влияние углерода на твердость углеродистых сталей в отожженном (1) и закаленном на мартенсит (2) состояниях

и низкого отпуска состоит из отпущенного мартенсита и избыточных карбидов (кроме сталей для ударного инструмента).

Для ударного инструмента, требующего повышенной вязкости, например для штампов горячего деформирования, долот, зубил, топорков, молотков и др., применяют доэвтектоидные стали, которые после закалки на мартенсит подвергают отпуску при более высокой температуре для получения структуры троостита или троосто-сорбита. Износостойкость и твердость этих сталей ниже, чем заэвтектоидных.

Другим важным критерием выбора инструментальных сталей служит теплостойкость (или красностойкость), т. е. способность сохранять высокую твердость при нагреве (устойчивость против отпуска при нагреве инструмента в процессе работы). Теплостойкость определяется температурой начала резкого падения твердости. По теплостойкости все инструментальные стали подразделяют на три группы:

- не обладающие теплостойкостью; к ним относятся углеродистые и легированные стали, содержащие суммарно до 4 % легирующих элементов (теплостойкость до 250 °С);
- полутеплостойкие, содержащие свыше 0,6÷0,7 % С и 4÷18 % Сг (теплостойкость до 500 °С);
- теплостойкие; ими являются высоколегированные стали карбидного (ледебуритного) класса, содержащие Сг, W, V, Мо, Со и получившие название *быстрорежущих* (теплостойкость до 650 °С).

Третьим критерием выбора инструментальных сталей является *прокаливаемость*. Эта характеристика особенно важна для многократно перетачиваемого инструмента (резцы, сверла, метчики, зубила). Высоколегированные теплостойкие и полутеплостойкие стали обладают высокой прокаливаемостью; умеренно легированные стали имеют повышенную прокаливаемость; в то же время углеродистые стали отличаются невысокой прокаливаемостью. Прокаливаемость необходима в целях возможности закалки готового инструмента из высокоуглеродистых сталей в масле во избежание коробления и трещинообразования.

Углеродистые инструментальные стали маркируют буквой У; следующая за ней цифра (У7, У8, У9, У10 и т. д.) показывает среднее содержание углерода в десятых долях процента. Буква А в конце марки (например, У10 А) указывает, что сталь высококачественная (т. е. содержит не более 0,025 % S и 0,025 % P). Легированные инструментальные стали Х, 9Х, 9ХС, 6ХВГ и т. д. маркируют числом, показывающим среднее содержание углерода в десятых долях процента, если его содержание меньше или больше 1 %. Если содержание углерода примерно 1 %, то цифра чаще отсутствует. Буквы означают легирующие элементы, а следующие за ними цифры — это содержание (в целых процентах) соответствующего легирующего элемента.

Быстрорежущие стали маркируют буквой Р. Следующее за ней число указывает среднее содержание главного легирующего элемента быстрорежущей стали — вольфрама (в процентах). Другие легирующие элементы обозначают так же, как и в маркировке конструкционных сталей.

Каждая группа инструментальных сталей должна обладать характерным набором свойств для успешной работы (табл. 3.5).

Применительно к выбору инструментальных сталей в общем случае можно руководствоваться *принципом обеспечения требуемой закаливаемости, прокаливаемости и теплостойкости при минимально достаточном легировании: уровень минимального легирования должен быть достаточным не только для обеспечения твердости, прокаливаемости на глубину рабочего слоя инструмента (с учетом его переточки), но и для создания необходимой теплостойкости инструмента, которая определяется требуемой скоростью обработки (точения, фрезерования, сверления и др.)*. Для каждой группы инструмента на первый план выходит та или иная сторона этого триединого принципа — износостойкость,

обеспечиваемая содержанием углерода в мартенсите (закаливаемостью), прокаливаемость или теплостойкость, достигаемые соответствующим уровнем легирования аустенита и мартенсита.

Таблица 3.5

Необходимые свойства инструментальных сталей

| Группа стали | Свойства стали |
|--|--|
| Стали для режущего инструмента | Высокая твердость в режущей кромке, износостойкость, достаточная прочность при некоторой вязкости для предупреждения поломки инструмента во время работы и теплостойкость, если резание выполняется с большой скоростью, прокаливаемость для перетачиваемого инструмента |
| Стали для штампов холодного деформирования | Высокая твердость, прочность, износостойкость при достаточной вязкости |
| Стали для штампов горячего деформирования | Высокие механические свойства (прочность и вязкость) при повышенных температурах, износостойкость, окалиностойкость, разгаростойкость, высокая прокаливаемость, нечувствительность к отпускной хрупкости |
| Стали для измерительного инструмента | Твердость, износостойкость и сохранение размеров при эксплуатации |

3.2.2. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из инструментальной стали

Рассмотрим решение задачи по выбору материала для изготовления сверл диаметром 15 мм, обрабатывающих углеродистые стали и серый чугун с небольшой скоростью. Нужно будет также указать технологию термической обработки, тип формирующейся структуры и получаемые свойства.

Так как при выборе стали для перетачиваемого режущего инструмента рекомендуется руководствоваться принципом обеспечения требуемой закаливаемости и прокаливаемости при *необходимой теплостойкости*, в данном случае можно использовать критерий сквозной прокаливаемости методом наименьшего, но достаточного легирования, исходя из диаметра сверла (15 мм). Углеродистые стали У9, У10 не подходят вследствие низкой прокаливаемости и теплостойкости, так как они могут успешно работать только в условиях, не вы-

зывающих разогрева режущей кромки, который неизбежен в случае сверления металла. Поэтому с целью обеспечения износостойкости, прокаливаемости и теплостойкости, достигаемых соответствующим уровнем легирования мартенсита, нужно перейти к легированным инструментальным сталям повышенной прокаливаемости, которые пригодны для резания материалов невысокой прочности с небольшой скоростью (до 8 м/мин), например, X, 9X1 или 9XC. Их можно использовать для изготовления инструмента, не подвергаемого в работе нагреву свыше $200 \div 250$ °С. Инструменты из этих сталей можно закалывать в масле и горячих средах (ступенчатая закалка), что уменьшает деформацию и коробление инструмента. Легирование кремнием усиливает стойкость мартенсита к распаду при нагреве (хотя способствует обезуглероживанию режущей кромки при нагреве под закалку). Таким образом, с учетом этих факторов целесообразным представляется выбор стали 9XC.

Предварительная термическая обработка заготовок из стали 9XC состоит в изотермическом отжиге на зернистый перлит (нагрев при $790 \div 810$ °С в течение $1 \div 2$ ч, охлаждение с печью до 710 °С, изотермическая выдержка $3 \div 4$ ч, охлаждение до 500 °С со скоростью 50 °С/ч, далее — на воздухе (твердость НВ $197 \div 241$). После изготовления сверл они подвергаются окончательной термической обработке — закалке из раскисленной соляной ванны ($\text{NaCl} + \text{KCl}$) с регламентированной выдержкой при 870 °С (нагрев в соли гарантирует подавление нежелательного обезуглероживания), охлаждение — в масле (с последующей промывкой) или ступенчатая закалка в расплавах солей при $160 \div 240$ °С и низкий отпуск $180 \div 220$ °С (на твердость $62 \div 63$ HRC). Окончательная структура сверл — отпущенный мартенсит и зернистые карбиды.

3.3. Стали, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды

К этой группе следует отнести коррозионно-стойкие (нержавеющие), жаростойкие (окалиностойкие), жаропрочные и хладостойкие стали.

3.3.1. Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали

Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали — это стали, устойчивые против электрохимической коррозии. Составы таких сталей выбирают в зависимости от среды, для работы в которой они предназначены.

Принцип минимально необходимого легирования может быть использован при выборе коррозионно-стойких, жаростойких, жаропрочных и иных специальных сталей и сплавов, однако в каждом конкретном случае в него вкладывается соответствующий смысл: для коррозионно-стойких сталей сумма легирующих элементов $\Sigma \geq 13\% \text{ Cr} + n\% (\text{Cr} + \text{Ni} + \text{Mo})$, где величина коэффициента n (от 0 до 45) зависит от интенсивности коррозионного воздействия.

Коррозионно-стойкие стали подразделяют на два основных структурных класса: 1) хромистые, имеющие после охлаждения на воздухе ферритную, мартенситно-ферритную (феррита более 10 %) или мартенситную структуру, и 2) хромоникелевые (легированные комплексами $\text{Cr} + \text{Ni}$, $\text{Cr} + \text{Ni} + \text{Mn}$, $\text{Cr} + \text{Mn} + \text{Ni}$, имеющие аустенитную, аустенитно-мартенситную или аустенитно-ферритную (феррита более 10 %) структуру).

Стали ферритного, мартенситного и мартенситно-ферритного классов. При введении в сталь 12÷14 % Cr ее электрохимический потенциал становится положительным и она приобретает устойчивость против коррозии в атмосфере, морской (пресной) воде, ряде слабых растворов кислот, солей и щелочей. Более широко применяют хромистые стали 12X13, 20X13, 30X13 и 40X13, содержащие 0,12÷0,4 % C и 12÷14 % Cr, и низкоуглеродистые ($\leq 0,12 \div 0,15\% \text{ C}$) стали 12X17 и 15X28 с 17 и 28 % Cr (табл. 3.6).

Сталь 12X13 в равновесном состоянии относится к полуферритным, а после закалки в масле или на воздухе от высоких температур имеет структуру мартенсита и феррита (ферритно-мартенситная сталь). Стали 20X13 и 30X13 в равновесном состоянии доэвтектоидные, а сталь 40X13 — эвтектоидная. Они испытывают полное $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращение. После охлаждения на воздухе стали 20X13, 30X13 и 40X13 имеют структуру мартенсита, т. е. относятся к мартенситному классу.

Стали обладают лучшей стойкостью против коррозии только при условии, что все содержание хрома в стали приходится на долю твердого раствора. В этом случае он образует на поверхности плотную за-

щитную оксидную пленку типа $(Cr, Fe)_2O_3$. Повышение содержания углерода, приводящее к образованию карбидов, создает двухфазную структуру, уменьшает количество хрома в твердом растворе и поэтому понижает коррозионную стойкость стали и увеличивает хрупкость.

Таблица 3.6

**Режимы термической обработки и механические свойства
хромистых нержавеющей сталей**

| Марка стали | Температура, °С | | Механические свойства | | | | | |
|-----------------|-----------------|---------|--------------------------|---------------------|-------------------------|--------------|------------|----------------------------|
| | заковки | отпуска | твёрдость, <i>HRC</i> | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % | KCU, МДж/м ² |
| 12X13 | 1000 | 700 | — | 600 | 400 | 20 | 60 | 90 |
| 20X13 | 1050 | 700 | — | 850 | 650 | 10 | 50 | 60 |
| 30X13 | 1050 | 250 | 40 | 1600 | 1300 | — | — | — |
| 40X13 | 1050 | 200 | 50 | — | — | — | — | — |
| 12X17 | 1050 | 750 | — | 450 | 300 | 15÷25 | 40÷50 | 2÷5 |
| 08X17T | | | | | | | | |
| 14X17H2 | 1050 | 300 | — | 1000 | 900 | 10 | 35 | 5 |
| 15X25T 15X28 | 1050 | 750 | — | 450 | 300 | 20 | 45 | — |

Коррозионная стойкость стали повышается термообработкой: закалкой и высоким отпуском и созданием шлифованной и полированной поверхности.

Стали 12X13 и 20X13 применяют для изготовления деталей с повышенной пластичностью, подвергающихся ударным нагрузкам (клапанов гидравлических прессов, предметов домашнего обихода), а также изделий, испытывающих действие слабоагрессивных сред (атмосферных осадков, водных растворов солей органических кислот и т. д.).

Стали 30X13 и 40X13 после закалки от температур 1000÷1050 °С и отпуска при температурах 180÷200 °С применяют для изготовления карбюраторных игл, пружин, хирургических инструментов и т. д. После такого отпуска они сохраняют мартенситную структуру, высокую твердость (50÷60 HRC) и достаточную устойчивость против коррозии.

Более высокой коррозионной стойкостью обладают низкоуглеродистые высокохромистые стали ферритного класса: 12X17, 15X25T и 15X28. Сталь 12X17 применяют обычно после рекристаллизационного отжига при 760÷780 °С. Из этой стали изготавливают оборудова-

ние для заводов пищевой и легкой промышленности и кухонную утварь. Сварку этой стали следует избегать, так как зоны, прилегающие к сварному шву, имеют крупное зерно, низкую пластичность и относительно невысокую коррозионную стойкость.

Стали 15X25T и 15X28 используют чаще без термической обработки для изготовления сварных деталей, работающих в более агрессивных средах и не подвергающихся действию ударных нагрузок, при температуре эксплуатации не ниже -20°C . Эти стали обладают крупнозернистостью в литом виде и склонны к сильному росту зерна при нагреве свыше 850°C (например, при сварке), что сопровождается охрупчиванием стали. Измельчить зерно и повысить пластичность термической обработки нельзя, так как стали не претерпевают $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения; сварные конструкции из стали 15X28 склонны к межкристаллитной коррозии. Углерод и азот способствуют охрупчиванию стали (повышают порог хладноломкости) и являются причиной межкристаллитной коррозии.

Этот вид коррозии связан с обеднением твердого раствора хромом в местах, прилегающих к границам зерна, в результате образования карбидов хрома. Для повышения сопротивления межкристаллитной коррозии и измельчения зерна сталь легируют титаном в количестве, не менее пятикратного содержания углерода (15X25T). Титан связывает углерод и исключает возможность образования карбидов хрома, а следовательно, обеднение хромом феррита.

Стали аустенитного класса. Эти стали, обычно легированные хромом и никелем (или марганцем), после охлаждения до комнатной температуры имеют аустенитную структуру, низкий предел текучести, умеренную прочность, высокую пластичность и коррозионную стойкость в окислительных средах. Стали парамагнитны.

Широко распространенные коррозионно-стойкие стали аустенитного класса 12X18H9, 12X18H10 содержат соответственно 0,12 % C, 17÷19 % Cr, 9÷10 % Ni. После медленного охлаждения стали имеют структуру: аустенит, феррит и карбиды хрома M_{23}C_6 . Для получения чисто аустенитной структуры, обладающей высокой коррозионной стойкостью, стали нагревают обычно до $1100 \div 1150^{\circ}\text{C}$ (для растворения карбидов) и закаливают в воде (на воздухе). Сталь 12X18H9 обычно применяют в виде холоднокатаного листа или ленты. В процессе холодной пластической деформации сталь легко наклепывается. Временное сопротивление после холодной деформации может быть повы-

шено до $1200 \div 1300$ МПа, при этом относительное удлинение снижается до $4 \div 5$ %. Упрочнение в процессе холодной деформации связано с наклепом, а также с протеканием мартенситного превращения. Чем менее стабилен аустенит, тем интенсивнее при холодной деформации происходит превращение аустенита в мартенсит (мартенсит деформации).

Стали хорошо свариваются точечной сваркой и штампуются. При нагреве закаленных сталей до $550 \div 750$ °С, например в процессе сварки, они охрупчиваются и приобретают склонность к межкристаллитной коррозии. Это связано с тем, что в пограничных зонах выделяются карбиды хрома $M_{23}C_6$ и происходит обеднение этих зон аустенита хромом ниже того предела (т. е. 12 %), который обеспечивает коррозионную стойкость. Для уменьшения склонности к межкристаллитной коррозии в состав сталей вводят титан (реже ниобий) в количестве ($5C \div 0,7$), где C — содержание углерода в стали, % (12X18H10T, 12X18H12T). В этом случае образуется карбид MC (TiC , NbC), связывающий весь углерод, а хром остается в растворе. Для повышения стабильности аустенита количество никеля в этих сталях увеличивают до $10 \div 12$ %. Сталь 12X18H10T получила наибольшее распространение для работы в окислительных средах (например, азотной кислоте). Высокое сопротивление межкристаллитной коррозии, хорошая пластичность и свариваемость имеют низкоуглеродистые аустенитные стали 04X18H10 и 03X18H12.

Аустенитные стали 12X18H9, 12X18H10T, 17X18H9 подвергают закалке в воде от температур $1100 \div 1130$ °С для получения следующих свойств: $\sigma_B = 520 \div 600$ МПа, $\sigma_{0,2} = 200 \div 230$ МПа, $\delta \approx 50$ % и $\psi \approx 50 \div 60$ %. Эти стали хорошо свариваются и штампуются; их применяют для изготовления деталей сварной аппаратуры.

Для работы в азотной кислоте и других сильно агрессивных средах при повышенных температурах используют стали с низким содержанием углерода: 08X18H10T, 04X18H10, 03X18H12.

С целью удешевления сталей часть никеля заменяют марганцем. Стали 10X14Г14Н4Т, 12X17Г9Н4 применяют для изготовления изделий, работающих в слабоагрессивных средах (органических кислотах, солях, щелочах). Устойчивость против коррозии в органических кислотах, серной кислоте и морской воде повышает молибден, например, в сталях 10X17H13M2T и 10X17H13M3T.

Для изготовления наиболее нагруженных конструкций применяют аустенитно-мартенситные стали, например 09Х15Н8Ю. Эту сталь подвергают закалке от температуры 975 °С, обработке холодом (в интервале температур $-50 \div -75$ °С) и старению при температуре 430 ÷ 500 °С. Свойства стали: $\sigma_B \approx 1200$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 950$ МПа, КС ≈ 400 Дж/см².

Для сварных конструкций, стойких против действия горячей (до 80 °С) серной кислоты, применяют сталь 06Х25Н28МДТ и более прочную сталь 0Х16 Н40М5ДЗТЗЮ. Последняя после закалки от температуры 1100 °С на воздухе и старения при температуре 650 °С имеет $\sigma_B \approx 1200$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 650$ МПа, $\delta \approx 18\%$ и $\psi \approx 25\%$.

3.3.2. Жаростойкие (окалиностойкие) стали

Способность металла сопротивляться химической коррозии в сухой газовой среде при высоких температурах называется *жаростойкостью* или *окалиностойкостью*.

Жаростойкие (окалиностойкие) стали — это стали, устойчивые против газовой коррозии при высоких температурах (выше 550 °С).

Железо с кислородом может образовывать оксиды трех видов: FeO, Fe₃O₄, Fe₂O₃. До 560 ÷ 600 °С окалина состоит преимущественно из плотного слоя оксидов Fe₂O₃ и Fe₃O₄, что затрудняет диффузию атомов кислорода и металла. Выше 600 °С происходит растрескивание этих оксидов и вместо них защита металла осуществляется лишь рыхлым оксидом FeO, что облегчает доступ кислорода к поверхности металла. Нагрев более 600 °С приводит к интенсивному окислению сплавов на основе железа.

Основным фактором, влияющим на жаростойкость, является химический состав сплава, определяющий защитные свойства оксидной пленки.

Повышения окалиностойкости достигают введением в сталь хрома, алюминия или кремния, т. е. элементов, находящихся в твердом растворе и образующих в процессе нагрева защитные пленки оксидов типа (Cr, Fe)₂O₃ или (Al, Fe)₂O₃. Хром и алюминий наряду с кремнием используют для повышения жаростойкости легированных сталей. Оксид легирующего элемента должен быть плотным, не подверженным растрескиванию при нагреве, иметь высокие температуры сублимации и плавления.

Введение в сталь 5 ÷ 8 % Cr повышает окалиностойкость до 750 °С; увеличение содержания Cr до 17 % делает сталь окалиностойкой

(до 1000 °С), а при введении 25 % Сг сталь остается окалиностойкой до 1100 °С. Легирование сталей с 25 % Сг алюминием в количестве 5 % повышает окалиностойкость до 1300 °С. Окалиностойкость зависит от состава стали, а не от ее структуры. В связи с этим окалиностойкость (жаростойкость) ферритных и аустенитных сталей при равном количестве хрома практически одинакова.

Принцип минимально необходимого легирования применительно к выбору жаростойких сталей может быть сформулирован следующим образом: сумма легирующих элементов $\Sigma \geq (5 \div 8)$, 17 или 25 % Сг + n % (Аl + Si), где количество хрома должно скачкообразно возрастать по мере увеличения требуемой температуры эксплуатации (показатель n характеризует интенсивность коррозионного воздействия и составляет величину от 0 до 5).

Для изготовления различного рода высокотемпературных установок, деталей печей и газовых турбин применяют ферритные (12Х17, 15Х25Т и др.) и аустенитные (20Х23Н13, 12Х25Н16Г7АР, 36Х18Н25С2, 20Х25Н20С2 и др.) стали, обладающие также жаропрочностью.

Температура окалиностойкости стали 15Х6СЮ составляет 800 °С, а стали 15Х18СЮ — около 1050 °С. Стали, легированные комплексом Сг + Si + Аl (10Х13СЮ, 15Х18СЮ и др.), устойчивы в серосодержащих средах. Стали, содержащие никель, плохо противостоят действию сернистых газов, но они могут обладать высокой окалиностойкостью и коррозионной стойкостью (стали 12Х18Н9Т, 08Х18Н10 и др.).

Учитывая, что высокое содержание алюминия и кремния способствует охрупчиванию и ухудшает технологическую пластичность при обработке давлением, основным легирующим элементом в жаростойких сталях является хром. Жаростойкие свойства растут с увеличением его концентрации в стали. Сталь, содержащая 5 % Сг, сохраняет окалиностойкость до 600 °С (15Х5), 9 % (40Х9С2) — до 800 °С и 17 % (08Х17Т) — до 900 °С.

Для изготовления деталей печного оборудования применяют стали 20Х23Н18, 20Х25Н20С2, имеющие окалиностойкость до 1100 °С. Эти марки относятся к аустенитному классу и характеризуются не только высокой жаростойкостью, но и высокой жаропрочностью. Хотя уровень жаростойкости стали и ее максимальная рабочая температура в основном определяются содержанием хрома, повышение температуры эксплуатации обуславливает одновременный рост концентрации никеля, что связано с необходимостью стабилизации аустенитной структуры.

3.3.3. Жаропрочные стали

При длительной работе под нагрузкой, не превышающей предела текучести, и нагреве до температур около $0,4 \div 0,5$ (или более) от абсолютной температуры плавления $T_{\text{пл}}$ металл испытывает медленную пластическую деформацию. Такая деформация называется *ползучестью*.

Жаропрочность — это способность материала сопротивляться деформации и разрушению при высоких температурах. Основными критериями жаропрочности металлов являются предел ползучести и предел длительной прочности.

Пределом длительной прочности называют напряжение, которое приводит к разрушению образца при заданной температуре за определенное время, соответствующее условиям эксплуатации изделий. Предел длительной прочности обозначают σ_t^t , где индексы t и τ указывают температуру ($^{\circ}\text{C}$) и время испытаний (ч).

Пределом ползучести называют напряжение, вызывающее заданную суммарную деформацию за определенное время при заданной температуре. Предел ползучести обозначают σ_{δ}^t / τ , где t — температура, $^{\circ}\text{C}$; δ — суммарное удлинение, %; τ — время, ч. Для деталей, длительное время работающих при повышенных температурах, задается обычно скорость ползучести на установившейся стадии процесса, например 0,1 % за 10^4 ч или за 10^5 ч.

В качестве температурного критерия удобно рассматривать не заданную абсолютную температуру T , а ее отношение к абсолютной температуре плавления $T/T_{\text{пл}}$ (так называемую гомологическую температуру).

При деформации нагретого металла в нем развиваются два противоположных процесса: упрочнение за счет наклепа при пластической деформации и разупрочнение в результате рекристаллизации. Если второй процесс преобладает, то в металле начинает развиваться диффузионное разупрочнение — возврат, рекристаллизация, коагуляция избыточных фаз, способствующие ползучести.

Температура и срок службы, на которые рассчитана машина или механизм, определяют выбор критерия жаропрочности и материала для их изготовления.

В соответствии с некоторыми рекомендациями срок службы ряда жаропрочных конструкций в зависимости от назначения составляет, ч:

| | |
|--|---------|
| Ракеты и их силовые установки | 1 |
| Силовые установки самолетов-истребителей | 100 |
| Силовые установки гражданских самолетов | 1000 |
| Газовые турбины локомотивов и судов | 10 000 |
| Газовые турбины стационарных силовых установок | 30 000 |
| Паровые турбины стационарных силовых установок | 100 000 |

Жаропрочные стали способны работать под напряжением при температурах выше 500 °С в течение определенного времени и обладают при этом достаточной жаростойкостью. Жаропрочные стали подразделяют по структурным классам на перлитные, мартенситные, мартенситно-ферритные и аустенитные (с твердорастворным, карбидным и интерметаллидным упрочнением). В этом же порядке возрастает жаропрочность сталей при переходе от одного структурного класса к другому. Для материалов, работающих при повышенных температурах в условиях окисления, например в энергетике или двигателестроении, характеристиками конструкционной прочности являются предел прочности σ_t , предел ползучести σ_{δ}/τ и скорость окисления (или температура начала интенсивного окисления).

Для жаропрочных сталей выбор структурного класса и в пределах этого класса минимального уровня достаточного легирования определяется максимальной рабочей температурой, действующим напряжением и требуемым сроком службы детали.

Жаропрочные стали в общем случае должны обладать следующими свойствами:

- 1) жаростойкостью, чтобы противостоять воздействию горячих газов;
- 2) достаточной жаропрочностью, чтобы за требуемый срок службы не происходила недопустимая пластическая деформация, обусловленная ползучестью;
- 3) высоким пределом выносливости при 20 °С, так как компрессор начинает работать от температур окружающей среды;
- 4) достаточным запасом пластичности и малой чувствительностью к надрезу, так как стали применяют для изготовления сложных деталей, работающих при знакопеременных нагрузках;
- 5) высокой термостойкостью, т. е. нечувствительностью к теплосменам, особенно в тех случаях, когда двигатель работает с частыми остановками;

б) высокой ударной вязкостью, чтобы противостоять динамическим нагрузкам при запуске двигателя.

Для конкретных деталей в зависимости от условий работы на первый план выходит тот или иной набор свойств из перечисленных или он может быть дополнен другими свойствами, например сопротивлением абразивному, адгезионному или эрозионному изнашиванию.

Рабочая температура эксплуатации повышается в ряду следующим образом:

стали перлитного класса → стали мартенситного класса с карбидным упрочнением → стали аустенитного класса «гомогенные» (только твердо-растворное упрочнение) → стали аустенитного класса с карбидным упрочнением → стали аустенитного класса с интерметаллидным упрочнением.

До температур порядка $0,5 T_{пл}$ деформация ползучести определяется стабильностью дислокационной структуры. При более высоких температурах активизируются диффузионные процессы, происходит растворение скоплений атомов легирующих элементов и примесей, что ослабляет степень закрепления дислокаций и облегчает их перемещение по кристаллу. В этих условиях сопротивление ползучести будет определяться силами межатомной связи.

Прочность межатомных связей большинства металлов недостаточна при высоких температурах. Для повышения жаропрочности необходимо снизить подвижность дислокаций и замедлить диффузию. ГЦК-решетка твердого раствора аустенитной стали в отличие от ферритной стали с решеткой ОЦК характеризуется более плотной упаковкой атомов. Благодаря этому, коэффициент диффузии для γ -железа с ГЦК-решеткой примерно на два порядка меньше, чем для α -железа с ОЦК-решеткой. В частности, этим объясняется то, что скорость ползучести стали резко изменяется при температуре превращения ОЦК → ГЦК. Аустенитные стали с ГЦК-решеткой имеют значительно более высокую жаропрочность по сравнению со сталями с ОЦК-решеткой.

Создание препятствий перемещению дислокаций достигается применением материалов, упрочненных дисперсными частицами. Упрочняющими фазами в жаропрочных сталях являются специальные карбиды, в никелевых сплавах — выделения интерметаллидной γ' -фазы с регулярной решеткой типа Ni_3 (Ti, Al, Nb, Ta). В сплавах, упрочненных большим количеством γ' -фазы, деформация обусловлена сдвигом в частицах этой фазы, поэтому такие сплавы характеризуются высокой прочностью и вязкостью. Гетерогенная структура с дисперсными ча-

стицами в сталях достигается после закалки и отпуска, а в жаропрочных сплавах — после закалки и старения.

Прочность межатомных связей в кристаллической решетке возрастает при легировании элементами с высокой температурой плавления — Сг, Мо, W, Nb, Та. Кроме того, эти же элементы снижают коэффициент самодиффузии и сдвигают температуру рекристаллизации в область более высоких температур, что также способствует росту жаропрочности.

Стали, предельные рабочие температуры которых не превышают $600\div 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, относят к *теплоустойчивым*. Они используются в энергетическом машиностроении для изготовления котлов, сосудов, паронагревателей, паропроводов и др. Эти же стали применяют в химическом и нефтяном машиностроении для работы при повышенных температурах. Как правило, теплоустойчивые стали работают в газовых или жидких средах при давлении $20\div 30\text{ МПа}$. Так, рабочие температуры в паросиловых установках обычно составляют $500\div 585\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении $25,5\text{ МПа}$, а в наиболее мощных установках достигают $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $31,5\text{ МПа}$. Детали таких установок должны работать длительное время без замены (до $100000\div 200000\text{ ч}$), поэтому основными требованиями являются заданное значение длительной прочности и сопротивление ползучести за весь ресурс эксплуатации.

Для изготовления деталей энергетических установок используют *перлитные стали*. Эти стали содержат Сг, Мо и V (12ХМ, 12Х1МФ, 25Х1МФ). Их подвергают нормализации от температуры $960\div 980\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отпуску при температуре $600\div 750\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В более легированных теплоустойчивых сталях, например 12Х2МФСР, превращение аустенита в верхней области температур с образованием полигонального феррита и перлита происходит только частично и при малых скоростях охлаждения (менее $1\div 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$), при больших скоростях охлаждения сталь имеет бейнитную, а при закалке — преимущественно мартенситную структуру.

Для любых дисперсионно-упрочненных сплавов жаропрочность зависит от размеров карбидных частиц и расстояния λ между частицами. Экспериментально показано, что время до разрушения непосредственно связано с дисперсностью структуры ($1/\lambda$).

Хромистые стали мартенситного и мартенситно-ферритного классов. В эту группу входят стали, содержащие от 5 до 13 % Сг и дополнительно легированные карбидообразующими элементами — молибденом, воль-

фрамом, ниобием, ванадием при содержании $0,08 \div 0,22$ % С. В структуре этих сталей могут присутствовать следующие составляющие: мартенсит, δ -феррит, карбиды (Me_{23}C_6 , Me_7C_3 , MeC) и интерметаллиды, в основном типа фаз Лавеса Fe_2Mo , $\text{Fe}_2(\text{Mo}, \text{W})$, $\text{Fe}_2(\text{Mo}, \text{W})$. Эти стали помимо более высокого значения длительной прочности обладают высокой жаростойкостью. В зависимости от содержания хрома и углерода они относятся или к мартенситному (до $10 \div 11$ % Сг), или к мартенситно-ферритному ($11 \div 13$ % Сг) классу, что определяется также сочетанием дополнительных легирующих элементов.

Эти стали являются более теплоустойчивыми и жаростойкими, чем низколегированные. Они также более жаростойки в продуктах сгорания жидкого и твердого топлива, чем хромоникелевые аустенитные стали. Высокая жаропрочность достигается за счет упрочнения твердого раствора, образования карбидов и интерметаллидных фаз. Наиболее сильно повышают жаропрочность вольфрам и ванадий в сочетании с молибденом. Легирование стали бором, цирконием, церием и азотом дополнительно увеличивает жаропрочность. Рабочие температуры этих сталей могут достигать $580 \div 600$ °С. Однако количество ферритообразующих элементов должно быть ограничено, в противном случае сталь может стать полужерритной, что снизит жаропрочность.

Хромистые стали этой группы обладают хорошими технологическими свойствами, высокой прочностью, пластичностью, ударной вязкостью. Кроме того, некоторые стали этой группы имеют высокую демпфирующую способность и удовлетворительную релаксационную стойкость.

Указанные стали применяют для различных деталей энергетического машиностроения (лопатки, трубы, крепежные детали, детали турбин и др.), в основном работающие длительное время при температурах $600 \div 650$ °С.

Для изготовления деталей газовых турбин и паросиловых установок применяют мартенситные стали 15X11МФ, 15X12ВНМФ. Их подвергают закалке в масле от температуры $1000 \div 1100$ °С и высокому отпуску при $650 \div 750$ °С. Для изготовления рабочих лопаток паровых турбин широко используется сталь 15X11МФ, которая проходит закалку на воздухе (масле) от $1050 \div 1100$ °С, отпуск при $680 \div 750$ °С. Высокие температуры закалки необходимы для растворения карбидов M_{23}C_6 и M_6C в аустените. Более высокие температуры закалки приводят к образованию в структуре большого количества δ -феррита, сни-

жающего прочность. После отпуска структура сталей — сорбит. Предел длительной прочности стали 15X11МФ при 550 °С в продолжении 10 тыс. ч составляет 150÷170 МПа. Стали поступают в виде сортового проката — горячедеформированного толстого листа и или горячедеформированных холодно- и теплодеформированных труб.

Для изготовления выпускных клапанов двигателей внутреннего сгорания применяют специальные углеродистохромистокремнистые мартенситные стали, например 40X9C2 и 40X10C2М (*сильхромы*).

Кремний (2÷3 %) и хром (6÷14 %) обеспечивают сопротивление газовой коррозии за счет образования на поверхности защитных пленок. Повышенное содержание углерода (до 0,4÷0,6 %) необходимо для того, чтобы в присутствии ферритообразующих элементов (хром, кремний) не допустить образования феррита в структуре и обеспечить закалку на структуру мартенсита, необходимую для придания сталям износостойкости. Введение молибдена и вольфрама повышает жаропрочность сталей, устраняет хрупкость после замедленного охлаждения.

Сильхромы обладают жаропрочностью до температур не выше 700 °С. При эксплуатации возможны кратковременные забросы температур, но не выше температуры начала интенсивного окисления. С увеличением в сталях содержания хрома и кремния повышается температура начала интенсивного окисления, что обусловлено влиянием этих элементов на образование плотных защитных пленок. К сталям 15X6CЮ и 40X9C2 применяют высокотемпературный отжиг. С учетом жаропрочности эти марки сильхромов могут работать при температурах до 600÷700 °С, при этом допускаются забросы температур до 800 °С. К более высокохромистым сильхромам 40X10C2М и 30X13H7C2 применяют упрочняющую обработку, состоящую из закалки и отпуска, что существенно повышает их прочностные характеристики. Рабочие температуры этих марок выбирают в соответствии с температурой отпуска. Стали 40X10C2М и 30X13H7C2 имеют максимально возможную прочность для материалов этого класса. Так, предел длительной прочности при температуре 550 °С за 10 тыс. ч составляет 130 МПа, предел ползучести на базе 100 ч — 62 МПа. При температурах выше 600÷700 °С эти стали разупрочняются.

Жаропрочные стали аустенитного класса. Для получения структуры аустенита эти стали должны содержать большое количество хрома, никеля и марганца. Для достижения высокой жаропрочности их дополнительно легируют Mo, W, V, Nb и В. Эти стали применяют для

деталей, работающих при $500 \div 750$ °С. Жаропрочность аустенитных сталей выше, чем жаропрочность перлитных, мартенситных, мартенситно-ферритных и ферритных.

Аустенитные стали пластичны и хорошо свариваются, однако по сравнению с перлитными и мартенситными обработка их резанием затруднена вследствие повышенной способности к наклепу и худшей теплопроводности. Сварной шов аустенитных сталей при наличии крупного зерна обладает повышенной хрупкостью. Полученное при перегреве крупное зерно вследствие отсутствия $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращения термической обработкой не измельчается.

Аустенитные стали по способу упрочнения подразделяют на три группы:

- 1) твердые растворы, не упрочняемые старением;
- 2) твердые растворы с карбидным упрочнением, в этом случае упрочняющими фазами могут быть как первичные (TiC, VC, ZrC, NbC и др.), так и вторичные карбиды ($M_{23}C_6$, M_6C , M_7C_3), выделяющиеся из твердого раствора;
- 3) твердые растворы с интерметаллидным упрочнением. Чаще в этих сталях упрочняющей фазой является γ' -фаза типа Ni_3Ti , Ni_3Al , $Ni_3(Ti, Al)$, Ni_3Nb и др. Стали с интерметаллидным упрочнением более жаропрочны, чем стали с карбидным упрочнением.

Аустенитные жаропрочные стали со структурой твердых растворов, например 10X18H12T, 08X15H24B4TP, 09X14H18B2BP и 09X14H19B2BP, предназначенные для изготовления пароперегревателей и трубопроводов силовых установок высокого давления, работающих при $600 \div 700$ °С, применяют в закаленном состоянии. Закалку проводят от $1100 \div 1160$ °С в воде или на воздухе. После закалки стали приобретают умеренную прочность и высокую пластичность ($\sigma_{100} = 250 \div 260$ МПа, относительное удлинение $\delta_5 = 20 \div 38$ % при 700 °С).

Для достижения высокой жаропрочности аустенитные стали с карбидным и интерметаллидным упрочнением подвергают термической обработке, состоящей из двух последовательных операций:

1. Закалка от $1050 \div 1200$ °С в воде, масле или на воздухе. Такую закалку проводят для растворения карбидных и интерметаллидных фаз в твердом растворе (аустените) и получения после охлаждения высоколегированного пересыщенного твердого раствора.

2. Старение при $600 \div 850$ °С. Оно предназначено для выделения дисперсных фаз из твердого раствора, упрочняющих сталь. Температура старения не должна вызывать заметной коагуляции избыточных фаз.

С увеличением легированности сплавов элементами, тормозящими процессы диффузии, температура старения возрастает. Для максимального и равномерного выделения интерметаллидных и карбидных фаз иногда применяют ступенчатое старение, например двойное: сначала при более высокой температуре, а затем при более низкой (или наоборот).

Высокая жаропрочность и карбидное упрочнение сталей достигаются введением в хромоникелевый или хромоникелемарганцевый аустенит $0,3 \div 0,5\%$ С и карбидообразующих элементов Мо, W, V, Nb и др. Такими сталями являются 45X14H14B2M и 40X15H7Г7Ф2МС. Сталь 45X14H14B2M применяют после отжига при 820°C (охлаждение на воздухе) для изготовления клапанов авиационных двигателей и в газотурбостроении для крепежа. После отжига структура стали — аустенит и карбиды типа $M_{23}C_6$ и M_6C .

Для изготовления различных деталей газотурбинных установок, работающих при небольших нагрузках (турбовозы, газовые стационарные турбины), а также для крепежных деталей применяют сталь 40X15H7Г7Ф2МС, в которой никель частично заменен марганцем. Упрочнение стали достигается закалкой от $1170 \div 1190^\circ\text{C}$ в воде (на воздухе) и старением при 800°C в течение $8 \div 10$ ч. В процессе старения образуются дисперсные карбиды $M_{23}C_6$ и VC, которые повышают механические свойства при нормальной и высоких температурах. Стойкость стали против окисления при температурах свыше 700°C невелика, поэтому детали алитируют или подвергают электролитическому никелированию.

К сталям с интерметаллидным упрочнением относится большая группа сложно легированных сталей. Основной упрочняющей фазой является γ' , по составу отвечающая соединению Ni_3Ti , а в присутствии алюминия — соединению $Ni_3(Al, Ti)$. При старении также возможно образование карбидов типа MC (TiC). Содержание углерода в этих сталях должно быть небольшим, так как он связывает молибден и вольфрам в карбиды, что понижает жаропрочность аустенита. Бор упрочняет границы зерен аустенита в результате образования боридов.

Сталь 10X11H20T3P применяют в виде листов для изготовления сварных элементов высокопрочных конструкций, работающих при температуре до $700 \div 750^\circ\text{C}$. Эту же сталь с большим количеством титана и алюминия без сварки используют для изготовления деталей газотурбинных двигателей, работающих при температуре $650 \div 700^\circ\text{C}$. Ли-

стовую сталь упрочняют закалкой от $1060 \div 1080$ °С и старением при 700 °С $3 \div 8$ ч (в зависимости от толщины листа). Холодная деформация перед старением повышает временное сопротивление.

Сталь 10X11H23T3MP, содержащая несколько больше никеля и дополнительно легированная молибденом, имеет лучшую жаропрочность при температурах $700 \div 750$ °С по сравнению со сталью 10X11H20T3P. Режим термической обработки первой из них для получения максимальной жаропрочности: закалка от $1100 \div 1130$ °С на воздухе (при крупных сечениях — в масле) и двойное старение при $750 \div 785$ °С 16 ч и при $600 \div 650$ °С $10 \div 16$ ч.

3.3.4. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из коррозионно-стойких сталей

Выбрать коррозионно-стойкий материал для изготовления кухонных раковин, технологию их изготовления, указать структуру и свойства материала.

Решение. Кухонные раковины обычно изготавливаются методом холодного прессования из листа коррозионно-стойкой стали, поэтому сталь должна обладать достаточно высокой пластичностью для осуществления глубокой вытяжки основного объема раковины, загиба бортов и окантовки на значительный угол без образования надрывов и трещин. В связи с этим наиболее дешевые хромистые ферритные стали типа 0X13 не следует использовать для этой цели, т. к. они имеют недостаточную технологическую пластичность ($\delta = 28\%$). В наибольшей степени условиям задачи удовлетворяют хромоникелевые стали аустенитного класса.

Эти стали после охлаждения до нормальной температуры имеют аустенитную структуру, низкий предел текучести, умеренную прочность, высокую пластичность и коррозионную стойкость в окислительных средах. Стали парамагнитны.

Широко распространенные коррозионно-стойкие стали аустенитного класса 12X18H9, 12X18H10 содержат соответственно $0,12\%$ С, $17 \div 19\%$ Cr, $9 \div 10\%$ Ni. После медленного охлаждения стального листа после горячей прокатки они имеют структуру: аустенит, феррит и карбиды хрома $M_{23}C_6$. Для получения чисто аустенитной структуры, обладающей высокой коррозионной стойкостью, стали обычно нагрева-

ют до $1100 \div 1150$ °С (для растворения карбидов) и закаливают в воде. Стали имеют следующие механические свойства: $\sigma_b = 520 \div 600$ МПа, $\sigma_{0,2} = 200 \div 230$ МПа, $\delta \approx 50$ % и $\psi \approx 50 \div 60$ %. Эти стали хорошо свариваются и штампуются; их применяют для изготовления деталей сварной аппаратуры.

Для изготовления кухонных раковин целесообразно выбрать сталь 12Х18Н9. После осветления поверхности закаленных листов их раскраивают на заготовки и подвергают холодному прессованию для придания формы кухонной моечной раковины, соответствующей необходимым стандартам качества.

3.4. Чугуны

Эти железоуглеродистые сплавы по своему функциональному содержанию и практическому применению столь важны, что заслуживают самостоятельного рассмотрения.

3.4.1. Основная характеристика чугунов

Промышленные чугуны, кроме железа и углерода, содержат кремний в количестве $1,0 \div 3,5$ %. Концентрация углерода в чугунах обычно не превышает $4,5$ %. Таким образом, чугун фактически является трехкомпонентным сплавом, а следовательно, и эвтектическое и эвтектоидное превращения в чугунах идут не при постоянной температуре, а в некотором интервале температур. Чугуны широко применяются для изготовления литых деталей. Это объясняется очень хорошими литейными свойствами чугунов: высокой жидкотекучестью, малой усадкой, хорошей заполняемостью форм. Изготовление деталей способом литья имеет ряд преимуществ: высокая экономичность процесса, возможность получать отливки сложной формы, небольшие потери металла при изготовлении отливок.

Отметим, что широкое применение получили серые чугуны, имеющие в структуре графит. Использование белых чугунов на практике относительно невелико из-за их низкой пластичности, обусловленной большой объемной долей цементита. Структура чугунов в литом

состоянии зависит от содержания в них углерода и кремния, а также от скорости охлаждения при кристаллизации. В свою очередь, скорость охлаждения определяется толщиной стенки отливки.

Таким образом, получению серого чугуна способствуют увеличение содержания углерода и кремния, а также снижение скорости кристаллизации (увеличение толщины стенки). Регулируя химический состав серого чугуна и скорость кристаллизации, можно изменять структуру металлической матрицы, переходя от перлитной к ферритно-перлитной, а затем к ферритной структуре.

Имеющиеся в структуре серого чугуна графитные пластины условно можно рассматривать как пустоты, поэтому серый чугун с пластинчатым графитом плохо работает при действии растягивающих напряжений, т. е. при растяжении, а также изгибе и кручении. Прочность на растяжение и пластичность серого чугуна относительно низкие. Серые чугуны маркируются буквами СЧ и различаются по составу и значениям предела прочности (временного сопротивления разрыву) σ_B . Например, чугун СЧ15 содержит $3,5 \div 3,7\%$ С, $2,2 \div 2,6\%$ Si, $0,5 \div 0,8\%$ Mn и имеет σ_B не менее 15 кгс/мм^2 (150 МПа). Соответственно у чугуна марки СЧ30, состав которого равен $3,0 \div 3,2\%$ С, $1,3 \div 1,9\%$ Si, $0,7 \div 1,0\%$ Mn, предел прочности σ_B составляет не менее 30 кгс/мм^2 (300 МПа). Относительное удлинение серых чугунов с пластинчатым графитом обычно не превышает $0,5 \div 1,0\%$.

Хотя серые чугуны имеют невысокие прочность при растяжении и пластичность, они хорошо работают при сжимающих напряжениях. Поэтому из серых чугунов с пластинчатым графитом делают различные станины и опоры для машин. Серые чугуны хорошо обрабатываются резанием (наличие графита делает стружку ломкой), обладают хорошими антифрикционными свойствами (графит играет роль естественной смазки), имеют повышенные демпфирующие свойства, т. е. хорошо гасят колебания. Изделия из серого чугуна мало чувствительны к внешним концентраторам напряжений — отверстиям, выточкам, надрезам и т. п.

Марки и механические свойства серого чугуна приведены в табл. 3.7.

По структуре, свойствам и применению серые чугуны можно разделить на несколько групп.

Ферритные и ферритно-перлитные чугуны СЧ10 и СЧ15 применяют для изготовления малоответственных деталей, испытывающих в работе небольшие нагрузки (при толщине стенки отливки $10 \div 30 \text{ мм}$).

Так, чугун СЧ10 используют для изготовления строительных колонн, фундаментных плит, а чугун СЧ15 — литых малонагруженных деталей сельскохозяйственных машин, станков, автомобилей и тракторов, арматуры и т. д.

Таблица 3.7

Механические свойства серых чугунов

| Марка чугуна | σ_B , не менее | | НВ | Марка чугуна | σ_B , не менее | | НВ |
|-----------------|-----------------------|-----|---------|-----------------|-----------------------|-----|---------|
| | кгс/мм ² | МПа | | | кгс/мм ² | МПа | |
| СЧ00 | Не регламентируется | | | СЧ25 | 25 | 245 | 183÷248 |
| СЧ10 | 10 | 98 | 143÷192 | СЧ30 | 30 | 294 | 187÷255 |
| СЧ15 | 15 | 147 | 163÷212 | СЧ35 | 35 | 343 | 197÷269 |
| СЧ20 | 20 | 196 | 170÷229 | СЧ40 | 40 | 392 | 207÷285 |

Перлитные чугуны СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35 применяют для изготовления ответственных отливок (станин мощных станков и механизмов, поршней, цилиндров и других деталей, работающих в условиях изнашивания при больших давлениях, компрессоров, арматуры, дизельных цилиндров, блоков двигателей, деталей металлургического оборудования и т. д.) с толщиной стенки до 100 мм. Структура этих чугунов — тонкопластинчатый перлит (сорбит) с мелкими завыхренными графитными включениями.

Перлитная металлическая основа в сером чугуне обеспечивает наибольшую прочность и износостойкость. Присутствие в структуре феррита не увеличивает пластичность и вязкость чугуна, но снижает его прочность и износостойкость. Наименьшей прочностью обладает ферритный серый чугун.

Связь между химическим составом, структурой и свойствами серых чугунов оценивают по структурным и структурно-прочностным диаграммам. Химический состав чугуна часто выражают при этом приведенным параметром — углеродным эквивалентом $C_э$ чугуна, который рассчитывают по действительному химическому составу чугуна, %:

$$C_э = C + 0,33 (Si + Al + P) + 0,08 Cu + 0,1Ni - 0,14 Mn - 0,24 Cr - 0,33V - 20 Mo,$$

где C, Si, Al, P, Cu, Ni, Mn, Cr, V, Mo — содержание соответствующих элементов.

Соотношение между содержанием основных элементов (углерода и кремния) в чугуне в зависимости от толщины стенки отливки можно выбирать, используя структурные и структурно-прочностные диаграммы, построенные в координатах «толщина стенки отливки a — углеродный эквивалент чугуна C_3 ». Примером может служить уточненная Г. И. Сильманом диаграмма, которая приведена на рис. 3.4. На этой диаграмме скорректировано положение области перлитных чугунов, отрегулировано положение линий чугунов различной прочности, нанесена шкала предела прочности σ_B , приведены две шкалы толщины стенок отливок (соответственно для сырых и сухих земляных форм).

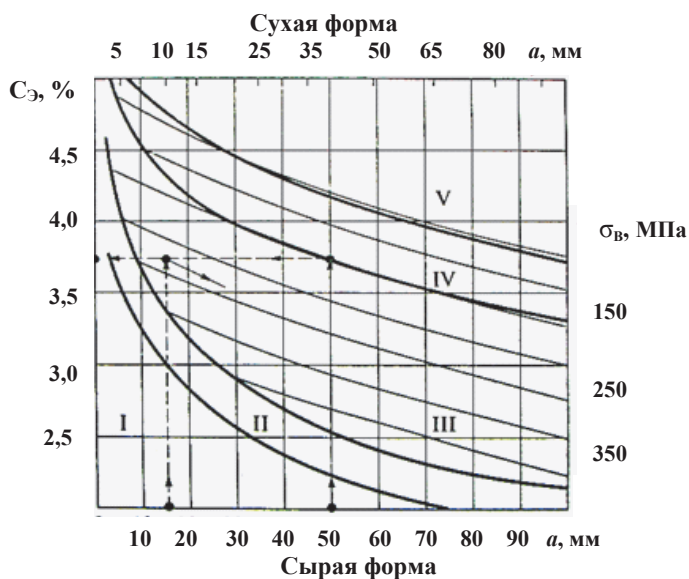


Рис. 3.4. Структурно-прочностная номограмма для отливок из серого чугуна с пластинчатым графитом:

C_3 — углеродный эквивалент; a — толщина стенки отливки; σ_B — предел прочности (временное сопротивление разрыву); I–V — структурные зоны: I — белый чугун; II — полувинчатый чугун; III — серый перлитный чугун; IV — серый перлитно-ферритный чугун; V — серый ферритный чугун; стрелками показан пример пользования номограммой для решения задачи, приведенной в тексте

Для выбора рационального химического состава чугуна с использованием углеродного эквивалента C_3 в табл. 3.8 даны рекомендуемые химические составы чугунов различных марок, рассчитанные по ним значения C_3 , а также наименьшая допускаемая толщина стенки отливки a_{\min} .

Таблица 3.8

**Рекомендуемые химические составы чугунов различных марок
и соответствующие им значения параметров $C_э$ и a_{min}**

| Чугун | Содержание элементов, мас. % | | | | | C _э | a _{min} , мм |
|--------------------|------------------------------|---------|---------|---------------|---------------|----------------|--------------------------|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | | |
| Немодифицированный | | | | | | | |
| СЧ00 | Не регламентируются | | | | | Более 4,61 | 2 |
| СЧ10 | 3,6÷3,8 | 2,5÷2,8 | 0,5÷0,8 | Не более 0,15 | Не более 0,15 | 4,36÷4,61 | 4 |
| СЧ15 | 3,4÷3,6 | 2,3÷2,6 | 0,6÷0,9 | Не более 0,15 | Не более 0,15 | 4,10÷4,36 | 6 |
| СЧ20 | 3,3÷3,5 | 2,1÷2,4 | 0,6÷0,9 | Не более 0,15 | Не более 0,15 | 3,85÷4,10 | 9 |
| СЧ25 | 3,1÷3,3 | 2,0÷2,3 | 1,0÷1,3 | Не более 0,20 | Не более 0,20 | 3,60÷3,85 | 12 |
| СЧ30 | 2,9÷3,1 | 1,9÷2,2 | 1,2÷1,4 | Не более 0,20 | Не более 0,20 | 3,40÷3,60 | 15 |
| Модифицированный | | | | | | | |
| СЧ25 | 3,1÷3,3 | 1,6÷1,9 | 1,0÷1,3 | Не более 0,20 | Не более 0,20 | 3,50÷3,80 | 11 |
| СЧ30 | 2,9÷3,1 | 1,6÷1,9 | 1,1÷1,4 | Не более 0,20 | Не более 0,20 | 3,25÷3,50 | 14 |
| СЧ35 | 2,8÷3,0 | 1,0÷1,2 | 1,0÷1,3 | Не более 0,20 | Не более 0,20 | 3,00÷3,25 | 15 |

Схема определения углеродного эквивалента чугуна отражена на диаграмме рис. 3.4. Предположим, что чугунная отливка имеет преобладающую толщину стенки 50 мм и должна быть получена методом литья в земляную форму «по-сырому». При этом необходимо обеспечить в отливке прочностные свойства не ниже марки СЧ20.

Из диаграммы видно, что этим условиям отвечает значение углеродного эквивалента $C_э < 3,7\%$. По диаграмме и по табл. 3.8 находим, что в данном случае нужно использовать чугун марки СЧ30 (т.е. соответствующий марке СЧ30 в стандартных литых пробах диаметром 30 мм; для круглых отливок толщину стенки приравнивают к радиусу отливки). Для обеспечения стабильных структуры и свойств по всему сечению отливки выбираем химический состав немодифицированного чугуна, %: 2,9÷3,1 C, 1,9÷2,2 Si, 1,2÷1,4 Mn, $C_э = 3,40÷3,6$.

Модифицированные чугуны СЧ30, СЧ35 получают обработкой расплава перед разливкой специальными добавками — модификаторами. В данном случае ими служит комбинация, состоящая из графита, 75 %-ного ферросилиция, силикокальция в количестве 0,3÷0,8 % и др.). Модифицирование применяют для получения в чугунных отливках с различной толщиной стенок перлитной структуры с пластинками графита средней величины. Для снятия литейных напряжений

и стабилизации размеров чугунные отливки отжигают при температуре $500 \div 600$ °С. В зависимости от формы и размеров отливки выдержка при температуре отжига составляет $2 \div 10$ ч. После такой обработки механические свойства изменяются мало, а внутренние напряжения снижаются на $80 \div 90$ %. Иногда для снятия напряжений в чугунных отливках применяют естественное старение чугуна — выдержку их на складе в течение $6 \div 10$ месяцев; такая выдержка снижает напряжения на $40 \div 50$ %.

Пластичность и прочность серых чугунов могут быть существенно повышены при изменении формы графитных включений. Для этого применяют специальное модифицирование чугунов небольшим количеством (около 0,05 %) магния или церия. При этом графит выделяется в более благоприятной шаровидной форме, в меньшей степени ослабляющей сечение металлической матрицы. Такие чугуны называются *высокопрочными чугунами* и обозначаются буквами ВЧ с добавлением цифры, указывающей значения σ_B в кгс/мм², например: ВЧ35, ВЧ40, ..., ВЧ100. При увеличении σ_B пластичность высокопрочных чугунов (относительное удлинение δ) уменьшается от 22 % для ВЧ35 до 2,0 % для ВЧ100. Содержание углерода в высокопрочных чугунах одинаковое и находится в пределах $3,2 \div 3,8$ %, а количество кремния переменное, причем с увеличением его концентрации прочность высокопрочных чугунов возрастает. Это обусловлено тем, что при этом меняется строение металлической матрицы. Чугуны ВЧ35 и ВЧ40 имеют ферритную матрицу, ВЧ45 и ВЧ50 — ферритно-перлитную, а ВЧ60, ВЧ70 и ВЧ80 — перлитную.

Требуемые механические свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) могут быть обеспечены в литом состоянии или после термической обработки. Испытания проводят на образцах, вырезанных из отдельно отлитых или прилитых к отливкам проб. Механические свойства ВЧШГ зависят от толщины стенки отливки, хотя и в меньшей степени, чем у серого чугуна. Прочность и твердость чугуна в пробах обычно выше, чем в реальных отливках.

Физико-механические свойства ВЧШГ наиболее эффективно повышаются за счет термической обработки отливок. Ее проводят также с целью улучшения обрабатываемости резанием, снятия внутренних напряжений, изменения структуры и т. д. Выбор вида и режима термической обработки (отжиг графитизирующий, отжиг низкотемпературный, отжиг для снятия внутренних напряжений, нормализация,

закалка с отпуском, изотермическая закалка, поверхностная закалка) производят исходя из требуемых свойств чугуна в детали, исходной микроструктуры чугуна в отливке и химического состава чугуна.

В ряде случаев могут быть проведены два вида термической обработки: обычно отжиг — для улучшения обрабатываемости отливки, закалка с низким отпуском (после механической обработки) — для повышения свойств чугуна в детали.

Изотермическая закалка — основной способ получения так называемых бейнитных чугунов с наиболее высокими прочностными свойствами ($\sigma_B = 900 \div 1500$ МПа, $\sigma_{0,2} = 730 \div 1300$ МПа) при сравнительно высокой пластичности (5 до 18 %) и ударной вязкости (КС до 100 Дж/см²). Предел прочности бейнитных чугунов при сжатии, изгибе, кручении и срезе составляет соответственно 1800÷2200; 1200÷1400; 700÷950; 550÷700 МПа.

Высокопрочные чугуны широко используют во многих отраслях техники взамен литой и ковanej стали, серого и ковкого чугунов. Половину мирового производства ВЧШГ составляют литые трубы диаметром 50÷2200 мм и длиной 2÷8 м. По механическим свойствам трубы из ВЧШГ не уступают стальным, а по долговечности превышают последние в 3÷8 раз в связи с более высокой коррозионной стойкостью. Их используют в напорных трубопроводах для воды, нефти, при изготовлении запорной и регулирующей арматуры, работающей в газовой и жидких средах, в том числе и при низких температурах.

Широко применяют ВЧШГ в автомобилестроении для изготовления таких деталей, как коленчатые и распределительные валы, блоки цилиндров, кронштейны рессор, тормозные барабаны, зубчатые колеса, поршни, поршневые кольца и др.

Особое внимание уделяют производству литых деталей из бейнитных чугунов, которые являются одновременно высокопрочными, высоковязкими и высокоизносостойкими сплавами. Применение бейнитных чугунов позволяет в 2 раза повысить предел выносливости коленчатых валов, на 40 % — предел текучести, на 35 % — предел прочности (по сравнению с перлитными чугунами марок ВЧ50 и ВЧ60). При этом примерно на 10 % можно снизить массу коленчатых валов.

Получение графита в компактной форме возможно при отжиге белого чугуна. Для этого используется белый чугун, содержащий порядка 2,4÷2,9 % С, 1,0÷1,6 % Si, 0,3÷1,0 % Mn. Для проведения отжига белый чугун нагревают сначала до температур 900÷1050 °С, с выдерж-

кой около 10 ч, а затем охлаждают в интервале $760 \div 720$ °С также в течение 10 ч. При этом в ходе нагрева до $900 \div 1050$ °С происходит переход из аустенитно-цементитной структуры в аустенитно-графитную, а при $760 \div 720$ °С — эвтектоидный распад аустенита на ферритно-графитную смесь по реакции $\gamma \rightarrow \alpha + C_{\text{граф}}$. В результате такого отжига получают графит в хлопьевидной форме и различную металлическую матрицу: ферритную, ферритно-перлитную, перлитную. Такой чугун называют *ковким чугуном*. Он обозначается буквами КЧ и двумя цифрами, первая из которых обозначает величину σ_B в кгс/мм², а вторая — относительное удлинение δ в %. Например: КЧ30-6, КЧ37-12, КЧ60-3. Ковкий чугун имеет более высокие по сравнению с серыми чугунами механические свойства, но отличается несколько худшими литейными свойствами. Поэтому минимальная толщина стенки в отливках из ковкого чугуна составляет 6 мм. Ограничение толщины стенки отливки максимальным значением 60 мм связано с плохой отжигаемостью исходного белого чугуна в больших сечениях.

В табл. 3.9 приведены механические свойства и структурный класс наиболее типичных марок ковких чугунов.

Таблица 3.9

Марки, свойства и структурные классы ковких чугунов

| Марка чугуна | σ_B , не менее | | δ , %, не менее | Твердость HB | Структурный класс |
|--------------|-----------------------|---------------------|------------------------|--------------|-------------------|
| | МПа | кгс/мм ² | | | |
| КЧ30-6 | 295 | 30 | 6 | 100÷165 | Ферритный |
| КЧ33-8 | 325 | 33 | 8 | — | — |
| КЧ35-10 | 345 | 35 | 10 | — | — |
| КЧ37-12 | 360 | 37 | 12 | — | — |
| КЧ45-7 | 440 | 45 | 7 | 150÷210 | Перлитный |
| КЧ50-5 | 490 | 50 | 5 | 170÷230 | — |
| КЧ55-4 | 540 | 55 | 4 | 190÷240 | — |
| КЧ60-3 | 590 | 60 | 3 | 200÷270 | — |
| КЧ65-3 | 640 | 65 | 3 | 210÷270 | — |
| КЧ70-2 | 690 | 70 | 2 | 240÷285 | — |
| КЧ80-1,5 | 785 | 80 | 1,5 | 270÷320 | — |

Ковкий чугун по прочностным свойствам и сочетанию механических свойств и износостойкости уступает ВЧШГ. Однако он превосходит их по хладостойкости и обрабатываемости резанием (особенно ферритный ковкий чугун). Обезуглероженный ковкий чугун является

единственным конструкционным чугуном, который хорошо сваривается и может быть использован для получения сварно-литых конструкций. Ковкий чугун хорошо поддается запрессовке, расчеканке и легко заполняет зазоры. Отливки из ферритного ковкого чугуна можно подвергать холодной правке, из перлитного — правке в горячем состоянии.

Механические свойства ковких чугунов определяют на литых образцах диаметром 16 мм. В зависимости от толщины стенки отливки допускают также применение образцов диаметром 8 или 12 мм.

Как высокопрочный, так и ковкий чугун применяются в различных отраслях промышленности для изготовления широкого круга изделий машиностроения, в том числе автомобильного, сельскохозяйственного и др.

Ковкий чугун применяют для изготовления тонкостенных деталей. Из него изготавливают детали, работающие при ударных и вибрационных нагрузках. Ферритные КЧ37-12 и КЧ35-10 используют для изготовления деталей, эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках (картеры редукторов, в т. ч. картеры ведущих мостов грузовых автомобилей, ступицы, крюки, скобы и т. д.), а КЧ30-6 и КЧ33-8 — для менее ответственных деталей (головки, хомутики, гайки, глушители, фланцы, муфты и т. д.). Из перлитных ковких чугунов изготавливают вилки карданных валов, звенья и ролики цепей конвейера, втулки, муфты, тормозные колодки и т. д.

3.4.2. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из чугунов

Выбрать экономичный материал для изготовления коленчатого вала легкового автомобиля ($\sigma_B \geq 500$ МПа, $\delta \geq 3\%$), обладающий антифрикционными свойствами, и обосновать технологический процесс его изготовления. Описать структуру и физико-механические свойства материала.

Решение. Коленчатый вал — сердце двигателя внутреннего сгорания. Именно он вращает все остальные движущиеся детали и узлы автомобиля и, в конечном счете, — колеса. Поэтому он является наиболее сложной и тяжело нагруженной деталью, технология его производства индивидуальна и имеет ряд особенностей. Работоспособность коленчатого вала в основном определяется износостойкостью шатунных и коренных шеек и способностью противостоять

усталостным разрушениям при циклических изгибающих нагрузках, начинающихся, как правило, у галтелей в местах сопряжений щек с шейками.

Перлитные чугуны с шаровидным графитом (ВЧШГ) — прекрасный конструкционный материал, они отличаются высокими прочностью и достаточной твердостью, хорошей обрабатываемостью, высокими износостойкостью и усталостной прочностью, что позволяет их использовать взамен кованных стальных коленчатых валов, несмотря на существенно более низкую твердость по сравнению со стальными и при значительно меньшей трудоемкости изготовления. Кроме того, они обладают преимуществами, присущими чугунам: демпфирующей способностью, низким коэффициентом трения вследствие присутствия графитных включений.

Поэтому коленчатые валы легковых автомобильных двигателей крупносерийного производства средней мощности целесообразно изготавливать по технологическим и экономическим соображениям из высокопрочных чугунов. Они имеют и техническое преимущество, заключающееся в возможности повышения прочности за счет придания им форм, более выгодных в отношении распределения напряжений, благодаря чему литые чугунные валы по сопротивлению усталости не уступают стальным. Исходя из условий задачи, оптимальным выбором материала можно считать чугун с шаровидным графитом марки ВЧШГ60-3 с перлитно-ферритной структурой. Содержание химических элементов в чугунах ГОСТом не регламентируется, однако на заводах для валов применяют чугуны определенного химического состава, определяемого техническими условиями или внутриводской технической документацией. Состав чугуна для крупных коленчатых валов, %: 3,4÷3,8 C, 1,9÷2,2 Si, 0,7÷1,0 Mn, ≤0,1 P, ≤0,1 Cr.

Такой чугун получают модифицированием, то есть путем сфероидизирующей внепечной обработки расплава низкосернистого чугуна различными веществами, чаще всего магнием в количестве 0,04÷0,08 % Mg, в результате чего изменяется форма, количество и характер распределения графитовых включений, которые приобретают в расплаве глобулярную форму.

После отливки, обычно в оболочковые формы, чугунные валы из высокопрочного чугуна подвергают нормализации (при 880÷900 °C в конвейерной печи, охлаждение с печью), иногда с последующим высоким отпускком. Структура — зернистый перлит и шаровидный гра-

фит. Для этого класса двигателей коленчатые валы из ЧШГ должны отвечать следующим требованиям:

- 1) по структуре металлической основы — перлит $> 75\%$, феррит $< 25\%$, цементит $< 2\%$;
- 2) по характеристике графитной составляющей — количество включений графита $N > 70$ шт/мм², диаметр включений графита < 60 мкм;
- 3) по свойствам — $\sigma_b \geq 600$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 370$ МПа, $\delta \geq 3\%$, твердость НВ = 207÷241, предел выносливости коленвала на испытательном стенде более $2 \div 10^6$ циклов.

Автомобильные коленчатые валы обрабатываются только по плоскостям щек и по сопрягаемым поверхностям. В коренных шейках, щеках и шатунных шейках просверливают каналы для подвода масла к коренным и шатунным подшипникам.

Коренные и шатунные шейки коленчатого вала автомобильных двигателей подвергают поверхностной закалке при индукционном нагреве, при этом в закаленном слое образуется мартенсит и твердость возрастает до HRC 47÷52. Для закалки используют установки нагрева шеек в петлевых индукторах с вращением. Закалочное охлаждение — водяным душем из спрейера, встроенного в индуктор. Время нагрева 12÷13 с, охлаждения — 7÷9 с. После закалки валы подвергают низкому отпуску при 180÷200 °С в течение 2 ч на структуру отпущенного мартенсита с графитом. Все детали контролируют на магнито-люминесцентных дефектоскопах.

Глава 4

Выбор материалов на основе цветных сплавов

В данной главе рассматриваются наиболее известные сплавы цветных металлов — их химические составы, основные функциональные свойства, технологические характеристики, а также приводятся примеры решения конкретных задач по выбору материала и способов их обработки с целью получения заданных свойств.

4.1. Медные сплавы

Сохраняя положительные качества меди (высокие тепло- и электропроводность, коррозионная стойкость), медные сплавы обладают хорошими механическими, технологическими и антифрикционными свойствами.

Для легирования медных сплавов главным образом используют элементы, растворимые в меди: это Zn, Sn, Al, Be, Si, Mn, Ni. Их присутствие повышает прочность, но при этом не снижает (а в некоторых случаях даже улучшает) пластичность. Так действуют, например Zn, Sn, Al. Отметим, что высокая пластичность — это, как правило, отличительная особенность медных сплавов. Так, некоторые однофазные сплавы меди имеют относительное удлинение δ до 65 %. Вместе с тем на медных сплавах можно обеспечить прочность на уровне 300÷500 МПа, что соответствует прочностным показателям низкоуглеродистых сталей. В то же время в некоторых медных сплавах (бериллиевые бронзы) после термической обработки можно получить

временное сопротивление разрыву σ_B , равное $1100 \div 1200$ МПа, а это уровень среднеуглеродистых сталей после термического упрочнения.

Медные сплавы принято подразделять на деформируемые и литейные, а также термически упрочняемые и термически неупрочняемые. Однако более широко известно деление медных сплавов на латуни, бронзы и медноникелевые сплавы.

4.1.1. Латуни

Латунями называют сплавы меди, в которых главным легирующим элементом является цинк. Их маркируют буквой Л и числами, характеризующими среднее содержание легирующих элементов. Так, например, латунь Л80 содержит 80 % Cu и 20 % Zn. Если латунь легирована, помимо цинка, другими элементами, то после буквы Л ставят условное обозначение этих элементов: С — свинец; О — олово; Ж — железо; А — алюминий; К — кремний, Мц — марганец, Н — никель. Числа после букв указывают среднее содержание каждого легирующего элемента в латуни, кроме цинка. Содержание цинка определяется по разности до 100 %. Так, например, в латуни ЛАЖМц66-6-3-2 содержится, %: 66 — Cu, 6 — Al, 3 — Fe, 2 — Mn и 23 — Zn.

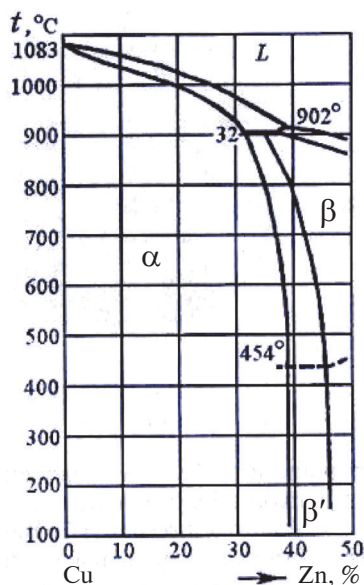


Рис. 4.1. Фрагмент диаграммы Cu-Zn

При сплавлении меди с цинком образуется ряд твердых растворов. Практическое применение имеют сплавы, содержащие до 50 % цинка, представляющие собой однофазные α- или двухфазные (α + β)-латуни. Часть диаграммы состояния Cu-Zn приведена на рис. 4.1. Здесь α-фаза — это граничный твердый раствор цинка в меди с ГЦК-решеткой, а β-фаза относится к одной из разновидностей электронных соединений типа CuZn (ОЦК-решетка, электронная концентрация $C_{эл} = 3/2$). При температурах $454 \div 468$ °C (штриховая линия на диаграмме) возможно образование упорядоченной β-фазы (ее обычно обозначают как β'), в решетке ко-

торой атомы меди располагаются в вершинах куба, а атомы цинка — в центре его объема.

Латуни обладают достаточно хорошими механическими и технологическими свойствами и высокой стойкостью к коррозии. Если содержание цинка менее 39 %, то латунь имеет однофазную α -структуру. Все сплавы этой области весьма пластичны и отлично обрабатываются давлением как в горячем, так и холодном состоянии. Латуни, содержащие более 39 % цинка, имеют двухфазную структуру $\alpha + \beta$ или однофазную β . Такие сплавы отличаются повышенной твердостью, менее пластичны при обычной (комнатной) температуре, но отлично обрабатываются в горячем состоянии. При обработке латуней давлением большую роль играет структура сплавов. При прокатке, волочении и штамповке с глубокой вытяжкой предпочтительна мелкозернистая структура с величиной зерна менее 50 мкм.

Свойства латуней в большой степени зависят от их химического состава. Прочность и пластичность при добавлении цинка повышаются, однако неравномерно (рис. 4.2). Наиболее интенсивное повышение прочности обнаруживается вблизи 40 вес. % Zn, пластичность при этом резко падает. Объяснением этому может служить появление в структуре сплавов твердой и хрупкой β' -фазы.

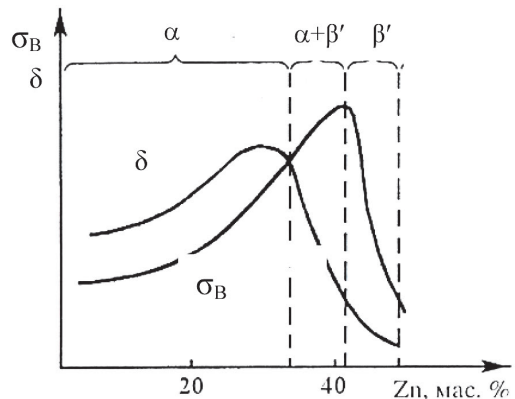


Рис. 4.2. Схема влияния концентрации Zn на механические свойства латуней

Механические и технологические свойства двойных латуней (два компонента — медь и цинк) приведены в табл. 4.1 (в отожженном состоянии/в холоднодеформированном состоянии)

Медноцинковые сплавы с добавками алюминия, железа, марганца, свинца, никеля и других элементов носят название *специальных* или *многокомпонентных латуней*. Под влиянием третьего компонента резко изменяются свойства этих сплавов.

Алюминий повышает механические свойства латуней и улучшает коррозионную стойкость.

Таблица 4.1

Механические и технологические характеристики латуней

| Свойства сплавов | Л96 | Л90 | Л80 | Л70 | Л68 | Л62 |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| σ_B , МПа | 240/450 | 260/480 | 320/640 | 320/660 | 320/660 | 330/600 |
| $\sigma_{0,2}$, МПа | —/390 | 120/400 | 120/520 | 91/520 | 91/520 | 110/500 |
| δ , % | 50/2 | 45/4 | 52/5 | 55/3 | 55/3 | 49/3 |
| Ψ , % | — | 80/— | 70/— | 70/— | 70/— | 66/— |
| a_H , МДж/м ² | 2,2/— | 1,8/— | 1,6/— | 1,7/— | 1,7/— | 1,4/— |
| НВ | — | 53/130 | 53/145 | —/150 | —/150 | 56/164 |
| t горячей обр. °С | 775÷850 | 850÷950 | 820÷870 | 750÷830 | 750÷830 | 650÷850 |
| t отжига, °С | 540÷600 | 650÷720 | 600÷700 | 520÷650 | 520÷650 | 600÷700 |

Железо задерживает рекристаллизацию латуней и измельчает зерно. Особенно благоприятное действие железо оказывает на латуни в сочетании с марганцем, никелем и алюминием.

Кремний значительно повышает механические, коррозионные и литейные свойства.

Марганец заметно повышает технологические, механические и коррозионные свойства латуней.

Никель значительно улучшает механические, коррозионные и технологические свойства и измельчает зерно.

Олово в количестве 0,5÷1,5 % весьма сильно повышает коррозионные свойства латуней, особенно в условиях морской воды, вследствие чего эти сплавы получили название морских латуней.

Свинец улучшает обрабатываемость латуней резанием, поэтому латуни, содержащие до 3 % свинца, широко распространены в промышленности.

В табл. 4.2 указаны химические составы и механические свойства ряда специальных латуней.

Основной вид термической обработки латуней — отжиг, который проводят для смягчения материала перед дальнейшей обработкой давлением, получения в готовых полуфабрикатах нужных свойств. Латуни подвергают отжигу первого рода, основанному на рекристаллизационных процессах. Температура рекристаллизации латуней выше, чем у меди, поскольку все легирующие элементы ее повышают. В промышленных условиях отжиг латуней проводят при

600÷700 °С. Другое назначение отжига — предотвращение склонности латуней к самопроизвольному коррозионному растрескиванию, которое происходит во влажной атмосфере при сохранении в металле после деформации остаточных напряжений. Развитию растрескивания способствует присутствие в атмосфере следов аммиака, аммонийных солей, сернистых газов. Это явление называют еще сезонной болезнью, так как оно чаще всего происходит весной и осенью, когда влажность воздуха повышена.

Таблица 4.2

Химические составы и механические свойства специальных латуней

| Наименование латуни | Марка | Содержание легирующих элементов, мас. % | σ_B , МПа, (отжиг/хол.деф.) | δ , % (отжиг/хол.деф.) | Температура горячей обработки, °С | Температура отжига, °С |
|---------------------------|-------------|---|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Алюминиевая | ЛА77-2 | 1,7÷2,5 Al | (350÷400)/600 | 50/18 | 720÷770 | 600÷650 |
| Алюминиево-железистая | ЛАЖ 60-1-1 | 0,75÷1,5 Fe, 0,1÷0,6 Mn, 0,75÷1,5 Al | 450/750 | 45/8 | — | — |
| Никелевая | ЛН65-5 | 5,0÷6,5 Ni | 400/700 | 65/4 | 750÷870 | 600÷650 |
| Железисто-марганцовистая | ЛЖМц59-1-1 | 0,6÷1,2 Fe, 0,5÷0,8 Mn, 0,1÷0,2 Al, 0,3÷0,7 Sn | 450/700 | (35÷50)/6 | 680÷730 | 600÷650 |
| Марганцовисто-алюминиевая | ЛМцА 57-3-1 | 2,5÷3,5 Mn, 0,5÷1,5 Al | 550/700 | 25/5 | — | — |
| Оловянистая | ЛО70-1 | 1,0÷1,5 Sn | 350/700 | 60/3 | 650÷750 | 560÷580 |
| Свинцовистая | ЛС74-3 | 2,4÷3,0 Pb | 350/650 | 40/3 | * | 600÷650 |
| Железисто-свинцовистая | ЛЖС 58-1-1 | 0,7÷1,3 Fe, 0,7÷1,3 Pb | 400 | 35 | — | — |
| Кремнистая | ЛК80-3 | 2,5÷4,0 Si | 300/600 | 58/4 | 750÷850 | — |

* В горячую не обрабатывается.

Растрескивание происходит из-за предпочтительной коррозии латуней по границам зерен в зоне неравномерного распределения остаточных напряжений. Это явление наблюдается в латунях, содержащих более 20 % Zn. Для устранения склонности к растрескиванию достаточно отжечь деформированные полуфабрикаты при температурах ниже температуры рекристаллизации. При таком отжиге эффективно снижаются остаточные напряжения первого рода и сохраняется высокая прочность, обусловленная деформацией. Для большинства латуней достаточно отжига при $270 \div 300$ °С, чтобы сделать их нечувствительными к воздействию влажной атмосферы.

4.1.2. Бронзы

Бронзами ранее называли сплавы меди с оловом. Позднее появились сплавы меди с алюминием, кремнием, бериллием и другими элементами, которые тоже называли бронзами. В настоящее время бронзами называют все сплавы меди, кроме латуней и медноникелевых сплавов.

Бронзы маркируют буквами Бр, а затем указывают основные легирующие элементы и их содержание в сплаве так же, как для латуней. Цинк в бронзах маркируют буквой Ц, фосфор — Ф, бериллий — Б, хром — Х. Так, например, бронза БрАЖМц10-3-1,5 легирована 10 % Al; 3 % Fe; 1,5 % Mn, остальное — Cu.

По основным легирующим элементам их подразделяют на оловянные, алюминиевые, бериллиевые и т. д.

Оловянными бронзами называются сплавы меди с оловом. Однако практическое значение имеют оловянные бронзы более сложного состава с добавками фосфора, цинка, свинца, никеля и других элементов.

Оловянные бронзы обладают достаточно хорошими механическими, антифрикционными, литейными и технологическими свойствами и отличаются высокой коррозионной стойкостью.

На рис. 4.3 представлен фрагмент диаграммы состояния Cu-Sn. В равновесных условиях предельная растворимость олова в меди (область граничного α -твердого раствора) соответствует почти 16 %. Однако сплавы этой системы характеризуются заметной склонностью к неравновесной кристаллизации, вследствие чего в реальных условиях охлаждения существенно сужается область α -фазы, ее предельная концентрация практически не меняется с понижением температуры,

не происходит эвтектоидного распада δ -фазы (см. штриховые линии диаграммы) и при содержании олова более 5÷8 % в структуре сплава присутствует эвтектоид $\alpha + \delta$, где δ -фаза — это электронное соединение $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ со сложной кубической решеткой. Оно обладает высокой твердостью и повышенной хрупкостью. Поэтому практическое значение имеют бронзы, в которых содержание олова обычно не превышает 10 %.

Структура оловянных бронз зависит от содержания олова и способа обработки.

Литые сплавы представлены резко выраженной дендритной структурой, что объясняется широким интервалом затвердевания этих сплавов.

Сплавы с пониженным содержанием олова, например бронзы марок БрОФ4-0,15 и БрОЦ4-3, после деформации и отжига состоят из однородных кристаллов твердого α -раствора.

Сплавы с повышенным содержанием олова состоят из кристаллов твердого α -раствора и эвтектоида ($\alpha + \delta$). В горячем состоянии δ -фаза довольно пластична, а в холодном — тверда и хрупка. Поэтому при определенных условиях можно деформировать в горячем состоянии сплавы с содержанием олова до 20 %, которые при комнатной температуре весьма хрупки.

Для обработки давлением применяют *деформируемые* сплавы с содержанием олова до 8 % и чаще с добавками фосфора, цинка или свинца. Оловянно-цинковая бронза марки БрОЦ4-3 хорошо переносит горячую и холодную обработку давлением. Оловянно-фосфористая бронза марки БрОФ4-0,15 обрабатывается в горячем (прессовка) и холодном состояниях (прокатка и волочение). Наконец, бронза марки БрОЦС4-4-2,5 обрабатывается лишь в холодном состоянии.

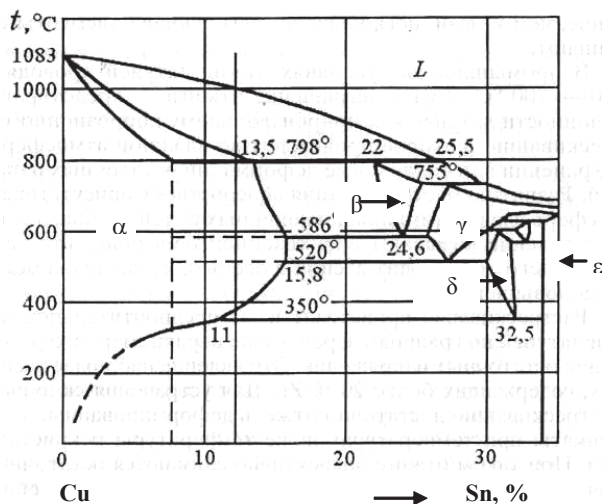


Рис. 4.3 Диаграммы состояния Cu-Sn

Оловянные бронзы хорошо воспринимают сварку и пайку, не дают искры при ударах, немагнитны, морозостойки и обладают весьма высокими антифрикционными свойствами.

Однако диффузия в оловянных бронзах протекает крайне медленно и дендритная ликвация исчезает лишь после многократной деформации и термической обработки, что также затрудняет технологический процесс обработки давлением этих сплавов.

В табл. 4.3 приведены состав и свойства стандартных деформируемых оловянных бронз, обрабатываемых давлением.

Таблица 4.3

Состав и свойства стандартных оловянных бронз, обрабатываемых давлением

| Наименование | Марка | Содержание легирующих элементов, мас. % | σ_B , МПа (отжиг/хол.деф.) | δ , % (отжиг/хол.деф.) | Температура горячей обработки, °С | Температура отжига, °С |
|--------------------------------|----------------|---|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Бронза оловянно-фосфористая | Бр.ОФ 6,5-0,15 | 6÷7 Sn, 0,10÷0,15 P | (350÷450)/(700÷800) | (60÷70)/(7,5÷12) | 750÷770 | 600÷650 |
| | Бр.ОФ 6,5-0,4 | 6÷7 Sn, 0,3÷0,4 P | (350÷450)/(700÷800) | (60÷70)/(7,5÷12) | 750÷770 | 600÷650 |
| | Бр.ОФ 6,5-0,25 | 3,5÷4,0 Sn, 0,15÷0,25 P | 340/600 | 52/8 | 750÷780 | 600÷650 |
| Бронза оловянно-цинковая | БрОЦ 4-3 | 3,5÷4,0 Sn, 2,7÷3,3 Zn | 350/550 | 40/4 | 750 | 600 |
| Бронза оловянно-цинкосвинцовая | Бр.ОЦС 4-4-2,5 | 3÷5 Sn, 3÷5 Zn, 1,5÷3,5 Pb | (300÷350)/(550÷650) | (35÷45)/(2÷4) | * | 600 |
| | Бр.ОЦС 4-4-4 | 3÷5 Sn, 3÷5 Zn, 3,5÷4,5 Pb | (300÷350)/(550÷650) | (35÷45)/(2÷4) | * | 600 |

* В горячую не обрабатывается.

Широко распространены *литейные* оловянные бронзы. Они условно подразделяются на три группы.

1. Литейные стандартные бронзы, предназначенные для получения разных деталей машин методом фасонного литья. К этим бронзам, по-

мимо высоких литейных свойств, предъявляются следующие требования: а) хорошая обрабатываемость резанием; б) высокая плотность отливок; в) достаточная коррозионная стойкость; г) высокие механические свойства. В литейных бронзах стремятся уменьшать содержание олова, заменяя его более дешевыми и менее дефицитными элементами. Чисто оловянные бронзы в этой группе отсутствуют, они легированы одновременно оловом, свинцом и иногда никелем. Цинк и свинец повышают жидкотекучесть и плотность бронз, их антифрикционные свойства, улучшают обрабатываемость резанием.

2. Литейные нестандартные бронзы (ответственного назначения), обладающие высокими антифрикционными свойствами и хорошим сопротивлением истиранию. Эти сплавы применяют для изготовления подшипников скольжения и других деталей, работающих в условиях трения. Непременный легирующий элемент этих сплавов — свинец, который улучшает антифрикционные свойства всех бронз, так как образует в них мягкую составляющую.

Для изготовления художественных изделий бронза оказывается наиболее подходящим материалом. Она достаточно жидкотекуча, хорошо заполняет самые сложные формы, обладает очень небольшой усадкой при затвердевании и поэтому хорошо передает форму изделия. Бронза отличается красивым видом, сохраняющимся благодаря ее высокой коррозионной стойкости достаточно долгое время. На поверхности бронз под воздействием естественной среды образуется патина — тончайшая окисная пленка различных цветовых оттенков, от зеленого до темно-коричневого. Патина придает бронзовым скульптурам и декоративным изделиям красивую ровную окраску.

В табл. 4.4 представлены механические свойства некоторых литейных бронз.

Таблица 4.4

Механические свойства литейных оловянных бронз

| Группа | Марка | σ_B , МПа | δ , % | НВ |
|------------------------------------|--------------|------------------|--------------|-----|
| Литейная стандартная | БрОЦНЗ-7-5-1 | 210 | 5 | 60 |
| Литейная стандартная | БрОЦС5-5-5 | 180 | 4 | 60 |
| Литейная стандартная | БрОЦС4-4-17 | 150 | 6 | 60 |
| Литейная ответственного назначения | БрОФ10-1 | 250 | 3 | 90 |
| Литейная ответственного назначения | БрО19 | 300 | 0,5 | 160 |
| Литейная ответственного назначения | БрОС5-25 | 140 | 6 | 50 |

Для снятия остаточных напряжений в отливках достаточно отжига при 550 °С в течение 1 ч. Промежуточный отжиг при холодной обработке давлением проводят при температурах 550÷700 °С. Основная цель этой операции — облегчение последующей обработки давлением.

3. Специальные бронзы — это двойные или более сложные сплавы на медной основе, содержащие в качестве добавок алюминий (алюминиевые бронзы), бериллий (бериллиевые бронзы), никель, кремний, марганец, хром и др. Специальные бронзы, применяемые для обработки давлением, отличаются высокими механическими свойствами и высокой коррозионной стойкостью.

В табл. 4.5 приведены состав, механические и технологические свойства специальных бронз.

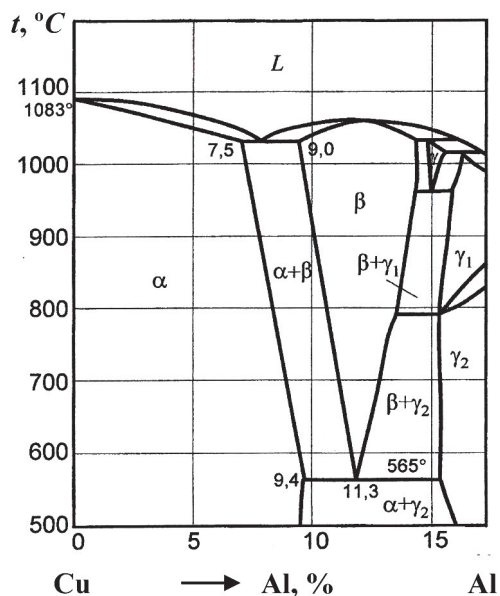


Рис. 4.4 Диаграмма состояния Cu-Al

Алюминиевые бронзы могут быть одно- и двухфазными (рис. 4.4). Однофазные (α -твердый раствор) сплавы характеризуются высокой пластичностью и отличной обрабатываемостью давлением. Двухфазные сплавы (с повышенным содержанием алюминия) отличаются повышенной прочностью и твердостью, но имеют пониженную вязкость в холодном состоянии. Алюминиевые бронзы весьма жидкотекучи и не склонны к ликвации. Они морозостойки, немагнитны и не дают искры при ударах. Отрицательными свойствами этих сплавов является то, что они трудно поддаются пайке

и лужению мягкими и твердыми припоями, недостаточно устойчивы к коррозии в среде перегретого пара и имеют повышенную объемную усадку.

Третий компонент и примеси существенно влияют на свойства алюминиевых бронз.

Железо незначительно растворимо в алюминиевых бронзах в твердом состоянии. При повышенном содержании железа оно выделяется в виде самостоятельной фазы, отвечающей по химическому составу

ву соединению Al_3Fe . Железо положительно влияет на алюминиевые бронзы, способствуя образованию более дисперсной структуры и значительно повышая механические свойства.

Таблица 4.5

Состав и свойства стандартных специальных бронз

| Наименование бронз | Марка | Содержание легирующих элементов, мас. % | σ_B , МПа, (отжиг/хол. деф.) | δ , % (отжиг/хол. деф.) | Температура горячей обработки, °C | Температура отжига, °C |
|----------------------------------|-----------------|---|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| Алюминиевая | БрА5 | 4÷6 Al | 380/750 | 65/5 | 830÷880 | 600÷700 |
| Алюминиевожелезная | БрАЖ 9-4 | 8÷10 Al, 2÷4 Fe | (500÷600)/(800÷1000) | 40/5 | 750÷850 | 700÷750 |
| Алюминиевожелезомарганцевая | БрАЖМц 10-3-1,5 | 9÷11 Al, 2÷4 Fe, 1÷2 Mn | (500÷600)/(700–900) | (20–30)/(9÷12) | 775÷825 | 650÷750 |
| Алюминиевожелезоникелевая | БрАЖ 10-4-4 | 9,5÷1 Al, 3,5÷5 Fe, 3,5÷5 Ni | (600÷700)/(900÷1100) | (35÷45)/(9÷15) | 850÷900 | 700÷750 |
| Алюминиево-никелевая (куниаль А) | МНА 13-3 | 2,3÷3,0 Al, 12÷15 Ni | 380/(900÷950) | — | 900÷1000 | 900 — закалка 500 — старение |
| Бериллиевая | БрБ2 | 0,2÷0,5 Ni, 1,9÷2,2 Be | 500/1250 | 35/(2÷4) | 760÷800 | 780 — закалка 320 — старение |
| Бериллиевая | БрБ2,5 | 0,2÷0,5 Ni, 2,3÷2,6 Be | 580/1350 | 25/(1÷2) | 760÷800 | 780 — закалка 320 — старение |
| Кремниво-марганцевая | БрКМц 3-1 | 1,0÷1,5 Mn, 2,75÷3,5 Si | (350÷400)/(650÷750) | (50÷60)/(1÷5) | 800÷850 | 700÷750 |
| Марганцевая | БрМц5 | 4,5÷5,5 Mn | 300/(500÷600) | 40/2 | 800÷850 | 700÷750 |
| Хромовая | БрХ0,5 | 0,4÷1,0 Cr | 230/480 | 30/11 | 900÷950 | 950÷1000 — закалка 400÷450 — старение |

Никель ограниченно растворим в алюминиевых бронзах в твердом состоянии. Он весьма значительно повышает прочность, твердость, жаростойкость и коррозионную устойчивость алюминиевых бронз. Эти бронзы удовлетворительно переносят технологическую обработку давлением.

Марганец значительно растворим в алюминиевых бронзах в твердом состоянии, оказывает на них положительное влияние, повышая коррозионную устойчивость. Эти бронзы морозостойки и отлично переносят обработку давлением в горячем и холодном состоянии.

Примеси висмута, сурьмы, мышьяка, свинца, фосфора и серы отрицательно влияют на алюминиевые бронзы, понижая их механические и технологические свойства.

Цинк также отрицательно влияет на алюминиевые бронзы, ухудшая их технологические и антифрикционные свойства.

В отношении общей коррозии в атмосферных условиях, морской воде, углекислых растворах, а также в растворах большинства органических кислот (лимонной, уксусной, молочной и др.) алюминиевые бронзы весьма устойчивы и значительно превосходят по коррозионной устойчивости сплавы меди с цинком и оловом.

Большинство алюминиевых бронз относится к термически неупрочняемым сплавам. Исключение составляет бронза БрАЖН10-4-4 (табл. 4.5), которая эффективно упрочняется после закалки и старения.

Распространение получили также *бериллиевые бронзы*. Эти сплавы обладают рядом весьма ценных свойств и поэтому играют большую роль в технике. Бериллиевые бронзы имеют высокие пределы прочности, упругости, текучести и усталости, отличаются высокой электропроводностью, теплопроводностью, твердостью, износоустойчивостью и обладают высоким сопротивлением ползучести, высокой усталостной стойкостью. Эти бронзы являются хладостойкими, они не магнитны и не дают искры при ударах. Оптимальное содержание бериллия в этих сплавах 2,1 %.

Бериллий с медью образует граничный твердый раствор замещения, при этом растворимость закономерно падает с понижением температуры, поэтому бериллиевые бронзы относятся к числу сплавов, термически упрочняемых старением.

Из *кремнистых бронз* наиболее распространенными являются бронзы с добавками марганца и никеля. Эти сплавы имеют высокие механические, коррозионные и антифрикционные свойства, отлично сварив-

ваются и паяются, немагнитны, не дают искры при ударах и не теряют своих свойств при низких температурах. Кремнистые бронзы отлично переносят обработку давлением как в горячем, так и в холодном состоянии.

Из *марганцевых бронз* следует отметить марку БрМц5, обладающую достаточно хорошими механическими свойствами (табл. 4.5). Эта бронза устойчива в коррозионном отношении и отличается повышенной жаропрочностью, поэтому успешно применяется для изготовления деталей, работающих при повышенных температурах.

Хром весьма ограниченно растворим в меди в твердом состоянии. При эвтектической температуре (1072 °С) растворимость хрома достигает 0,65 %. С понижением температуры граница растворимости твердого α -раствора резко сдвигается в сторону меди и при 400 °С она равна 0,02 %. По характеру диаграммы состояния *хромовые бронзы* можно отнести к дисперсионно твердеющим сплавам. Примером хромовой бронзы может служить сплав БрХ0,5 (см. табл. 4.5). Помимо высоких механических и технологических свойств, она имеет хорошую электропроводность и теплопроводность, а также повышенную температуру рекристаллизации.

4.1.3. Медно-никелевые сплавы

Медно-никелевые сплавы — это сплавы на основе меди, в которых основным легирующим элементом, определяющим свойства сплава, является никель. Эти компоненты образуют систему с непрерывным рядом твердых растворов, т. е. для них характерна неограниченная растворимость в твердом состоянии.

Медно-никелевые сплавы по области применения делят на две группы: конструкционные и электротехнические.

К *конструкционным медно-никелевым сплавам* относятся сплавы типа куниаля, мельхиора, нейзильбера. Эти сплавы отличаются повышенными механическими и коррозионными свойствами.

Медно-никелевые сплавы с добавкой алюминия — *куниаль А* (сплав МНА13-3) и *куниаль Б* (сплав МНА6-1,5) выпускают, чаще всего, в виде прутков и полос.

Мельхиор МН19 отличается высокой коррозионной стойкостью и хорошими механическими свойствами. Мельхиор с повышенным

содержанием никеля МНЖМц 30-0,8-1 выделяется высокой коррозионной стойкостью в пресной и морской воде и паре.

Медно-никелевый сплав с добавкой цинка МНЦ 15-20 — *нейзильбер* («новое серебро») исключительно коррозионностоек. Он отличается красивым серебристым цветом и удовлетворительно обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии.

В табл. 4.6 приведены составы и свойства ряда конструкционных медно-никелевых сплавов.

Таблица 4.6

Состав и свойства стандартных конструкционных медно-никелевых сплавов

| Марка сплава | Содержание легирующих элементов, % | σ_B , МПа, (отжиг/хол. деф.) | δ , % (отжиг/хол. деф.) | Температура горячей обработки, °С | Температура отжига, °С |
|----------------|---|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| МНА13-3 | 12÷15 Ni+Co, 2,3÷3,0 Al, остальное медь | 700/ (900÷1000) | 7/4 | 900÷1000 | 900 — закалка, 500 — старение |
| МН19 | 18÷20 Ni+Co, остальное медь | 350/500 | 35/4 | 980÷1030 | 600÷780 |
| МНЖМц 30-0,8-1 | 29÷30 Ni+Co, 0,6÷1,0 Fe; 0,8÷1,3 Mn; остальное медь | 380/600 | (40÷0)/4 | 900÷960 | 780÷810 |
| МНЦ15-20 | 13,5÷16,5 Ni+Co, 18÷22 Zn; остальное медь | 400/670 | 45/2,5 | 950÷970 | 700÷750 |

Электротехнические медно-никелевые сплавы обладают особыми термоэлектрическими свойствами.

Манганин (МНМц3-12) отличается высоким электросопротивлением, малым температурным коэффициентом сопротивления и небольшой термоэлектродвижущей силой в паре с медью.

Константан (МНМц40-1,5) обладает высокой термоэлектродвижущей силой, малым температурным коэффициентом сопротивления и постоянством электросопротивления.

Копель (МНМц43-0,5) характеризуется высоким удельным электросопротивлением. При контакте с медью, железом и т. д. дает большую термоэлектродвижущую силу при ничтожно малом (практически равным нулю) температурном коэффициенте.

В табл. 4.7 приведены химические составы и механические свойства электротехнических медно-никелевых сплавов.

Таблица 4.7

**Химические составы и механические свойства электротехнических
медноникелевых сплавов**

| Марка сплава | Содержание легирующих элементов, мас. % | σ_B , МПа, (отжиг/хол.деф.) | δ , % (отжиг/хол. деф.) | Температура горячей обработки, °С | Температура отжига, °С |
|--------------|---|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| МНМц 3-12 | 2,5÷3,5 Ni+Co, 11,5 ÷ 13,5 Mn | 430/850 | 30/2 | 800÷850 | 700÷750 |
| МНМц 40-1,5 | 39÷41 Ni+Co, 1,0÷2,0 Mn | 450/650 | 30/2 | 1080÷1130 | 800÷850 |
| МНМц 43-0,5 | 42,5÷44,0 Ni+Co, 0,1÷1,0 Mn | 400/650 | 35/4 | 1100÷1150 | 800÷850 |

4.1.4. Применение меди и ее сплавов

Области применения меди и ее сплавов очень разнообразны. Чистую медь и малолегированные сплавы с высокой электропроводностью широко используют в электротехнике. Большое количество меди расходуется на провода высоковольтных линий электропередачи, воздушных линий связи. Из медных сплавов делают коллекторные шины для электромашин, токоподводящие шины и другие изделия высокой электропроводности.

Высокая теплопроводность меди обусловила ее использование в различного рода теплообменниках, конструкциях печей для дуговой плавки таких активных металлов, как титан, цирконий, тугоплавкие металлы. Из меди делают водоохлаждаемые изложницы, поддоны, кристаллизаторы, которые обеспечивают интенсивный отвод тепла от расплава.

Латуни с высоким содержанием меди (85÷90 %) имеют красивый золотистый блеск, хорошо воспринимают эмалировку и золочение, их используют для производства ювелирных, декоративных и художественных изделий, а также знаков отличия, специальной фурнитуры. Используемая для этих целей высокомедистая латунь, например, типа Л90, называется томпаком.

Высокотехнологичные латуни применяют для получения изделий, требующих глубокой вытяжки. Из этих латуней изготавливают радиаторные и конденсаторные трубки, сильфоны, гибкие шланги, трубы, ленты. Типичным примером является латунь марки Л68 (ее называют патронной, подчеркивая этим ее высокую склонность к холодной штамповке и глубокой вытяжке).

Многокомпонентные, или специальные латуни, обладающие достаточно высокой прочностью и коррозионной стойкостью, применяют в судостроении, электромашиностроении, теплотехнике.

Из латуней, легированных свинцом, производят детали, работающие в условиях трения. Их используют также в часовом производстве, автотракторной промышленности, типографских машинах.

Благодаря малой линейной усадке и хорошей жидкотекучести широкое практическое использование получили литейные оловянные бронзы.

О сферах применения оловянных бронз говорят сами названия: бронзы, легированные $9\div 11\%$ Sn и 2% Zn, называли пушечными, так как они были наиболее подходящим из медных сплавов материалом для пушек. Бронзы этого типа (БрОЦ10-2, БрОЦ8-4, БрОЦС5-5-5) до сих пор применяют в машиностроении.

Лучшими колокольными бронзами являются двойные сплавы с $18\div 22\%$ Sn, при этом качество звучания (низкое рассеяние энергии звука) определяется объемной долей δ -фазы в структуре сплава.

Из оловянных бронз отливают художественные изделия. Оловянные бронзы с фосфором из-за их высоких антифрикционных свойств и хорошей коррозионной стойкости применяют также в машиностроении для изготовления подпятников тяжелых кранов, разводных мостов, прокладок подшипников и втулок, гаек ходовых винтов, шестерен, червячных колес и других деталей, работающих на трение. Оловянные бронзы используют также для деталей водяной, паровой и газовой арматуры. Некоторые бронзы, в частности легированные фосфором, с высокими упругими свойствами применяют для изготовления круглых и плоских пружин.

Наибольшее распространение получили алюминиевые бронзы. Они используются прежде всего как заменители оловянных. Эти сплавы распространены в морском судостроении, общем машиностроении, авто- и авиастроении. Из высокопрочных алюминиевых бронз изготавливают ответственные детали: шестерни, втулки, седла клапанов, гай-

ки нажимных винтов, подшипники, пружины и пружинящие детали, детали электрооборудования.

Бериллиевую бронзу используют для изделий наиболее ответственных назначений: плоские пружины, мембраны, детали точного приборостроения, пружинящие элементы электронных приборов и устройств, электроды сварочных машин. На менее ответственные пружины идут кремнистые бронзы. Поскольку бериллиевые бронзы не дают искр при ударе, из них делают инструмент для работы во взрывоопасных условиях.

Свинцовые бронзы — один из лучших подшипниковых материалов. Из них производят опорные и шатунные подшипники мощных турбин, авиационных моторов, дизелей и других быстроходных машин. Эти сплавы используют также для пластинчатых токосъемников.

Коррозионно-стойкие медноникелевые сплавы, в частности мельхиоры, применяют в установках для опреснения морской воды, в морском судостроении (конденсаторные трубы), для изготовления медицинского инструмента, деталей точных приборов, столовых приборов.

Электротехнические медно-никелевые сплавы широко применяются в пирометрии в качестве компенсационных проводов и электродов термопар, а также широко используются в радиотехнических и других приборах, где рабочая температура выше комнатной.

4.1.5. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из медных сплавов

Для изготовления змеевиков и конденсаторных трубок холодильников используют материал с высокой пластичностью и коррозионной стойкостью. Привести состав выбранного материала, технологию его обработки, структуру и свойства.

Решение. Исходя из общего принципа предпочтительного выбора более пластичных однофазных медных сплавов со структурой α -твердого раствора для изделий, получаемых с помощью технологии холодного волочения, остановимся на латунях Л68, Л70, обладающих наибольшей пластичностью. Эти латуни прекрасно выдерживают обработку давлением как в горячем, так и в холодном состоянии. При этом, как правило, обладают и более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с многофазными сплавами. В латуни Л68, когда содержание меди в ней уменьшается до нижнего предела (67 %), в ликвационных участ-

ках могут возникать более богатые цинком β -кристаллы, охрупчивающие сплав, однако при правильном выборе режима отжига слитков перед прокаткой (850 ± 20 °С) в результате диффузии β -фаза исчезает. Поэтому выбираем для трубок латунь Л68 (часто называемую патронной), имеющую более высокий комплекс механических свойств. Средние механические свойства латуни Л68 в отоженном состоянии: $\sigma_B = 330$ МПа, $\delta = 60$ %, НВ = 65.

После холодного волочения трубок со степенью 50 % в результате деформации прочность сильно возрастает: $\sigma_B = 570$ МПа, $\delta = 6$ %, НВ = 168 (по заводским данным). Промежуточный отжиг с последующим травлением проводят в интервале температур $700 \div 600$ °С, окончательный в целях снятия наклепа и получения мелкого зерна ($0,01 \div 0,05$ мм) — при температурах $450 \div 550$ °С, желательно в проходных печах в атмосфере экзотермического газа.

4.2. Алюминиевые сплавы

Алюминий — легкий серебристого цвета металл с плотностью $2,698$ г/см³ и электропроводностью $2,6548$ мкОм·см при 20 °С; температурой плавления 660 °С, модулем Юнга 71000 МПа. Он имеет гранецентрированную кубическую решетку. Прочностные свойства алюминия растут, а характеристики пластичности уменьшаются с увеличением содержания примесей. Эти свойства значительно меняются даже при изменении чистоты алюминия от 99,5 до 99,99 %. Например, алюминий 99,5 % чистоты обладает следующими свойствами: $\sigma_B = 70$ МПа; $\sigma_{0,2} = 28$ МПа; НВ = $18 \div 25$; $\delta = 45$ %. Для алюминия 99,99 % чистоты эти же свойства составляют соответственно 50 МПа; 22 МПа; $12 \div 16$; 65 %.

Алюминий имеет высокую тепло- и электропроводность. Электропроводность алюминия чистотой 99,997 % составляет 65,5 % от электропроводности меди. Примеси и легирующие элементы уменьшают электропроводность алюминия. Особенно сильно повышают его электросопротивление марганец, ванадий, хром и титан, мало влияют никель, кремний, цинк, железо и медь.

Алюминий — химически активный металл. Но он легко покрывается с поверхности окисной пленкой (толщиной $5 \div 10$ нм), которая защищает его от дальнейшего взаимодействия с окружающей средой.

Алюминий хорошо обрабатывается давлением, сваривается контактной и газовой сваркой, но плохо поддается резанию.

Применение нашел не чистый алюминий, а его сплавы. Перечислим основные композиции на основе алюминия.

Сплавы системы Al-Cu являются наиболее важными из этого ряда. Медь имеет значительную растворимость и большой эффект упрочнения.

Система Al-Mg служит основой важного класса термически не упрочняемых сплавов. Двойные сплавы, содержащие менее 7 % Mg, не обладают эффектом старения. Однако они имеют достаточный уровень прочности и обладают склонностью к деформационному упрочнению.

На основе системы Al-Mn созданы многие термически упрочняемые сплавы. В деформируемых сплавах, содержащих более 1 % Mn, присутствие марганца приводит к значительному увеличению прочности.

Двойные сплавы Al-Si играют большую роль в литейном производстве. Кремний значительно увеличивает жидкотекучесть, а следовательно, и плотность отливок. Благодаря этому, а также специфической микроструктуре легирование кремнием приводит к увеличению прочности. Сплавы с кремнием применяются как присадочные материалы при пайке и сварке.

Сплавы Al-Zn применяются в качестве электрохимической защиты от коррозии. Цинк входит в состав деформируемых сплавов почти всегда вместе с магнием.

Многокомпонентные сплавы систем Al-Cu-Mg, Al-Mg-Zn и Al-Mg-Si являются основами целого семейства термически упрочняемых сплавов с разнообразными свойствами.

Структура готового изделия формируется под действием целого комплекса факторов: состава сплава, режимов процесса деформации, механической и термической обработки.

Неотъемлемой частью структуры являются интерметаллидные соединения (как правило, алюминия с примесями или легирующими элементами). Их можно различить по специфической форме, твердости и окраске после травления. Мелкие частицы выделяются из твердого раствора в объеме зерен, по их границам или по границам субзерен и на дислокациях. Их размер, форма и распределение зависят от термической обработки.

Сплавы на основе алюминия делятся на литейные, деформируемые и гранулированные.

4.2.1. Литейные алюминиевые сплавы

Они маркируются буквами АЛ, что значит алюминиевые литейные. Наиболее распространены системы Al-Si, Al-Cu, Al-Mg. Химический состав и наиболее типичные свойства литейных сплавов на основе алюминия приведены в табл. 4.8.

Лучшими литейными свойствами обладают сплавы Al-Si (силумины). Высокая жидкотекучесть, малая усадка, отсутствие или низкая склонность к образованию горячих трещин и хорошая герметичность силуминов объясняются наличием в структуре этих сплавов большого количества эвтектики, состоящей из твердого раствора и кристаллов практически чистого кремния. Силумины хорошо свариваются. Обработываются резанием только силумины, легированные медью.

Механические свойства зависят от химического состава, технологии изготовления (модифицирования, способа литья и др.) и термической обработки.

Таблица 4.8

Химический состав и свойства литейных алюминиевых сплавов*

| Сплав | Содержание элементов**, мас. % | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | НВ, МПа | Жидкотекучесть | Корроз. стойкость | Свариваемость |
|-------|---|------------------|----------------------|--------------|---------|----------------|-------------------|---------------|
| АЛ2 | 10÷13 Si | 180 | 80 | 6 | 500 | 1 | 3 | — |
| АЛ4 | 8,0÷10,5 Si 0,17÷0,30 Mg 0,2÷0,5 Mn | 260 | 200 | 4 | 750 | — | — | — |
| АЛ9 | 6÷8 Si 0,2÷0,4 Mg | 220 | 160 | 3 | 750 | 1 | 2 | 2 |
| АЛ32 | 7,5÷8,5 Si 0,3÷0,5 Mg 1,0÷1,5 Cu; 0,3÷0,5 Mn 0,1÷0,3 Ti | 270 | 160 | 3 | 800 | 1 | 3 | 2 |
| АЛ7 | 4÷5 Cu | 260 | 200 | 3 | 700 | 3 | 4 | 3 |
| АЛ8 | 9,5÷11,5 Mg | 320 | — | 12 | — | 4 | 1 | 5 |

* В последних трех колонках цифра 1 соответствует сплаву с лучшими свойствами, а цифра 5 — с худшими. ** Остальное — алюминий.

Типичная микроструктура силумина состоит из мягкой пластичной матрицы в виде α -твердого раствора и эвтектики. По мере увеличения

содержания кремния в доэвтектических сплавах увеличивается содержание эвтектики, в результате чего повышается прочность и снижается пластичность. В заэвтектических сплавах (более 12 % Si) структура состоит из эвтектики и кремния. Появление в структуре сплавов крупных кристаллов первичного кремния вызывает снижение прочности и пластичности.

Двойные сплавы не упрочняются термической обработкой. Это объясняется высокой скоростью распада твердого раствора, который частично происходит уже при закалке, а также большой склонностью к коагуляции стабильных выделений кремния. Единственным способом повышения механических свойств этих сплавов является измельчение структуры путем модифицирования.

Силумины обычно модифицируют натрием, который в виде хлористых и фтористых солей вводят в жидкий сплав в количестве $2 \div 3$ % от массы сплава.

Модифицируют как двойные, так и легированные силумины, содержащие более $5 \div 6$ % Si.

Для легирования силуминов часто используют Mg, Cu, Mn, Ti, Ni, Zr, Cr. Растворяясь в алюминии, они повышают прочность и твердость силуминов. Кроме того, медь улучшает обрабатываемость резанием, титан оказывает модифицирующее действие. Медь и магний, обладая ограниченной растворимостью в алюминии, способствуют упрочнению силуминов при термической обработке, как правило, состоящей из закалки и старения. Температура закалки различных силуминов находится в пределах $515 \div 535$ °С, температура старения — в интервале $150 \div 180$ °С. Грубокристаллическая структура литейных сплавов требует больших выдержек при нагреве под закалку ($5 \div 10$ ч) и при старении ($10 \div 20$ ч).

Из легированных силуминов средней прочности наибольшее применение в промышленности нашли сплавы с добавками магния (АЛ9), а также магния и марганца (АЛ4). Наибольшее упрочнение вызывает метастабильная фаза Mg_2Si . Легированные силумины применяют для средних и крупных литых деталей ответственного назначения: корпусов компрессора, картеров, головок цилиндров.

Высокопрочный сплав АЛ32 предназначен для литья под давлением. Сплав обладает хорошими литейными свойствами, обрабатываемостью резанием, свариваемостью и коррозионной стойкостью. Марганец и титан, а также большая скорость кристаллизации при литье

под давлением способствуют получению метастабильной структуры при отливке деталей. Это дает возможность упрочнять отливки путем искусственного старения без предварительной закалки. Наилучшим является старение при $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 8 ч, когда выделяются метастабильные фазы CuAl_2 и Mg_2Si . При этом временное сопротивление увеличивается на $30\div 40$ МПа, твердость по Бринеллю — на 180 МПа. При изготовлении деталей другими методами литья сплав АЛ32 подвергают полной упрочняющей термической обработке — закалке при $515\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и старению при $175\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сплав АЛ32 применяют для литья под давлением нагруженных деталей, например блоков цилиндров, головок блоков и других деталей автомобильных двигателей.

Сплавы системы Al-Cu (АЛ7) характеризуются высокой прочностью при обычных и повышенных температурах; они хорошо обрабатываются резанием и свариваются. Вместе с тем из-за отсутствия эвтектики сплавы обладают плохими литейными свойствами, имеют низкую герметичность. Как и деформируемые сплавы этой системы, они имеют структуру твердого раствора, но отличаются повышенным содержанием меди. Эвтектика в данной системе (в отличие от силуминов) образуется при высоком содержании меди (33 %), поэтому имеет большое количество твердой и хрупкой фазы (CuAl_2), вызывающей хрупкость эвтектических сплавов. Литейные и механические свойства сплавов алюминия с медью улучшаются в результате легирования титаном и марганцем (АЛ19). Марганец, образуя пересыщенный твердый раствор при кристаллизации из жидкого состояния, способствует значительному упрочнению сплава. Например, после закалки сплав АЛ19 имеет следующие механические свойства: $\sigma_B = 320$ МПа; $\sigma_{0,2} = 180$ МПа; $\delta = 9\%$; $\text{HB} = 800$ МПа. При последующем искусственном старении происходит дальнейшее упрочнение сплава, вызываемое фазой CuAl_2 ; так предел текучести увеличивается почти на 40 %, достигая 250 МПа.

Сплавы алюминия с медью используют для деталей, работающих при температурах до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сплавы системы Al-Mg (АЛ8) обладают высокой коррозионной стойкостью, прочностью, вязкостью и хорошей обрабатываемостью резанием. Они не содержат в структуре эвтектики по той же причине, что и сплавы системы Al-Cu, и характеризуются невысокими литейными свойствами, пониженной герметичностью и, кроме того, повышенной чувствительностью к примесям Fe, Si, которые образуют в этих сплавах нерастворимые фазы, снижающие пластичность сплавов.

Наилучшие механические свойства сплавы этой системы приобретают после закалки от 530 °С, когда весь магний находится в твердом растворе.

Сплавы систем Al-Mg применяют для изготовления деталей, работающих в условиях высокой влажности, в судо-, самолето- и ракетостроении.

4.2.2. Деформируемые алюминиевые сплавы

Эти сплавы делятся на термически неупрочняемые и упрочняемые. К сплавам, неупрочняемым термической обработкой, относятся сплавы АМц и АМг (табл. 4.9), которые отличаются высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью.

Сплавы АМц относятся к системе Al-Mn. Структура сплава АМц состоит из α -твердого раствора и вторичных выделений фазы $MnAl_6$. В отожженном состоянии сплав обладает высокой пластичностью и низкой прочностью. Пластическая деформация упрочняет сплавы почти в 2 раза.

Сплавы АМг относятся к системе Al-Mg. Магний образует с алюминием α -твердый раствор, концентрация которого при повышении температуры увеличивается от 1,4 до 17,4 % в результате растворения фазы Mg_2Al . Сплавы, содержащие до 7 % Mg, дают очень незначительное упрочнение при термической обработке. Вследствие этого сплавы АМг, как и АМц, упрочняют с помощью пластической деформации.

При повышении содержания магния в структуре сплавов АМг увеличивается количество фазы $MgAl_3$. При этом временное сопротивление повышается от 110 МПа (АМг1) до 430 МПа (АМг6) при соответствующем снижении относительного удлинения с 28 до 16 %. Однако легирование магнием вызывает склонность к окислению во время плавки, разливки и кристаллизации, что приводит к появлению оксидных пленок в структуре и снижению механических свойств. Поэтому сплавы с высоким содержанием магния для устранения склонности к окислению легируют бериллием. Укрупнение зерна, вызванное бериллием, устраняется добавкой титана или циркония.

Сплавы типа АМц и АМг применяют для изделий, получаемых глубокой вытяжкой, сваркой, от которых требуется высокая коррозионная стойкость (трубопроводы для бензина и масла, сварные баки), а также

для заклепок, переборок, корпусов и мачт судов, лифтов, узлов подъемных кранов, рам вагонов, кузовов автомобилей и др.

Таблица 4.9

Промышленные деформируемые сплавы

| Марка | Химический состав, мас. % | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % |
|----------------------------------|-------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|
| Термически неупрочняемые сплавы | | | | |
| АД00 (отжиг) сверхчистый Al | 99,99 Al | 45 | 10 | 50 |
| АД00 (наклеп) сверхчистый Al | 99,99 Al | 120 | 115 | 5 |
| АМг1 (отжиг) конструкционный | 0,8 Mg | 125 | 45 | 30 |
| АМг1 (наклеп) конструкционный | 0,8 Mg | 205 | 200 | 5 |
| АМг2 (отжиг) декоративный | 0,1 Cu; 0,1 Mn; 2,5 Mg | 200 | 90 | 25 |
| АМг2 (наклеп) декоративный | 0,1 Cu; 0,1 Mn; 2,5 Mg | 265 | 220 | 10 |
| АМц (отжиг) фольга | 1,2 Mn | 115 | 45 | 30 |
| АМц (наклеп) фольга | 1,2 Mn | 205 | 190 | 5 |
| Термически упрочняемые сплавы | | | | |
| Д1 | 4 Cu; 0,6 Mg; 0,6 Mn | 450 | 280 | 20 |
| Д16 | 4 Cu; 1,2 Mg; 0,6 Mn | 500 | 380 | 18 |
| Д18 | 2,7 Cu; 0,3 Mg | 300 | 170 | 25 |
| АК6 | 2,2 Cu; 0,6 Mg; 0,6 Mn; 1 % Si | 400 | 300 | 12 |
| АК8 | 4,3 Cu; 0,6 % Mg; 0,7 Mn; 1 % Si | 480 | 380 | 9 |
| В95 (отжиг) высокопрочный | 1,6 Cu; 2,5 Mg; 0,3 Cr; 5,6 Zn | 230 | 105 | 17 |
| В95 (закалка) высокопрочный | 1,6 Cu; 2,5 Mg; 0,3 Cr; 5,6 Zn | 590 | 520 | 11 |

Типичные представители сплавов, упрочняемых термической обработкой, — это дуралюмины (маркируют буквой Д). Они характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности и относятся к сплавам системы Al-Cu-Mg. Медь с алюминием образуют твердый раствор, максимальная концентрация меди в котором 5,65 % при эв-

тектической температуре. С понижением температуры растворимость меди резко уменьшается, достигая 0,1 % при 20 °С. При этом из твердого раствора выделяется фаза CuAl_2 , обладающая сравнительно высокой твердостью. В сплавах, дополнительно легированных магнием, помимо фазы CuAl_2 , образуется фаза CuMgAl_2 . При гомогенизации сплава с марганцем наряду с растворением указанных фаз из раствора выделяется марганцевый интерметаллид (фаза Al-Cu-Mn) в дисперсном виде.

Чем больше меди содержится в сплаве, тем большее количество фазы CuAl_2 будет в его структуре (Д1). Увеличение содержания магния приводит к росту количества фазы CuMgAl_2 и повышению прочности сплавов (Д16).

После закалки структура этих сплавов состоит из пересыщенного твердого раствора и нерастворимых фаз, образуемых примесями. Для упрочнения дуралюминов, как правило, применяют закалку с естественным старением, так как в этом случае сплавы обладают лучшей пластичностью и менее чувствительны к концентраторам напряжений.

Искусственному старению (190 °С, 10 ч) подвергают лишь детали, используемые для работы при повышенных температурах (до 200 °С).

Дуралюмины широко применяют в авиации. Из сплава Д1, например, изготавливают лопасти воздушных винтов, из Д16 — шпангоуты, нервюры, тяги управления и др. Кроме того, их используют для строительных конструкций, кузовов грузовых автомобилей, обсадных труб и др. Сплав Д18 — один из основных заклепочных алюминиевых сплавов. Заклепки из сплава Д18 ставят в конструкцию после закалки и естественного старения.

Ковочные алюминиевые сплавы маркируют буквами АК. Они обладают хорошей пластичностью и стойки к образованию трещин при горячей пластической деформации. По химическому составу сплавы близки к дуралюминам, отличаясь более высоким содержанием кремния. Ковку и штамповку сплавов ведут при температуре 450÷475 °С. Их применяют после закалки и искусственного старения. Сплавы с пониженным содержанием меди (АК6) отличаются лучшей технологической пластичностью, но меньшей прочностью. Их используют для средненагруженных деталей сложной формы. Сплавы с повышенным содержанием меди (АК8) хуже обрабатываются давлением, но более прочны и применяются для высоконагруженных деталей несложной формы.

Высокопрочные алюминиевые сплавы маркируют буквой В. Они отличаются высоким временным сопротивлением и близким к нему по значению пределом текучести (табл. 4.9). Высокопрочные сплавы принадлежат к системе Al-Zn-Mg-Cu и содержат добавки марганца и хрома или циркония. Эти элементы, увеличивая неустойчивость твердого раствора, ускоряют его распад, усиливают эффект старения сплава.

Сплавы применяют для высоконагруженных деталей конструкций, работающих в основном в условиях напряжения сжатия.

4.2.3. Порошковые сплавы

В настоящее время в промышленном масштабе выпускаются алюминиевые порошки самых различных размеров и форм. Размер колеблется от 0,015 до 17000 мкм. Форма — от сферической (с низким отношением площади поверхности к массе) до тонких пластинок и частиц неправильной формы (с высоким отношением площади поверхности к массе).

Порошки используются в качестве пигментов, химикатов, горючего в твердом ракетном топливе, во взрывчатых веществах, а также находят применение в порошковой металлургии.

Порошковыми называют сплавы, полученные путем компактирования из частиц. Порошки получают, например, распылением жидкого металла струей чистого нейтрального газа. Порошковые полуфабрикаты (изделия) имеют чрезвычайно мелкозернистую структуру и минимальную ликвацию. Но особенно большим достоинством данных материалов является метастабильное состояние. При столь высоких скоростях охлаждения при кристаллизации получают пересыщенные твердые растворы с концентрацией, в 2,5÷5 раз превосходящей предельную растворимость компонентов в равновесных условиях. Такие твердые растворы называют аномально пересыщенными.

В процессе технологических операций горячего компактирования сплавов (400÷450 °С) из пересыщенного твердого раствора выпадают дисперсные частицы интерметаллидных фаз (Al_6Mn , Al_7Cr , Al_3Zr и др.), которые повышают температуру рекристаллизации, увеличивают прочность при обычных и повышенных температурах.

Порошковые сплавы алюминия с элементами, практически нерасстворимыми в нем в равновесных условиях и сильно отличающимися

от него по плотности, имеют гетерогенную структуру, представляющую собой алюминиевую матрицу с равномерно распределенными дисперсными включениями второй фазы. В сплавах, легированных сравнительно тугоплавкими металлами (Fe, Ni, Co), такими фазами будут интерметаллиды, они эффективно упрочняют их. В сплавах с такими легкоплавкими металлами, как Sn, Pb, в алюминии будут присутствовать дисперсные включения чистых металлов, соответственно, Sn и Pb. Эти сплавы обладают хорошими антифрикционными свойствами.

4.2.4. Особенности термообработки алюминиевых сплавов

Термическая обработка применяется в связи с необходимостью:

- 1) разупрочнить сплав и улучшить его пластичность;
- 2) увеличить прочность и получить особые механические свойства;
- 3) стабилизировать механические, физические свойства или коррозионную стойкость;
- 4) обеспечить размерную стабилизацию в процессе эксплуатации;
- 5) снять остаточные напряжения, возникающие в процессе закали, литья, деформации.

Отливки обычно подвергаются отжигу (при $450 \div 550$ °С в течение $4 \div 20$ ч), чтобы уменьшить химическую неоднородность литой структуры.

Если этой обработке подвергаются предварительно деформированные полуфабрикаты, то цель отжига — устранить наклеп. Режим этой обработки: нагрев до 340 °С и выдержка для достижения равномерного прогрева.

Отжиг закаленных материалов должен обеспечивать выделение и коагуляцию равновесной фазы. Его проводят при температурах $350 \div 400$ °С в течение $2 \div 3$ часов, с последующим охлаждением до 260 °С со скоростью не более 30 град/ч.

Для достижения максимальных прочностных свойств применяют закалку (температура нагрева $450 \div 550$ °С + охлаждение в воде комнатной температуры). Коррозионная стойкость при этом также улучшается. В процессе закалки за счет быстрого охлаждения фиксируется твердый раствор, имеющий не только концентрационное пересыщение, но и пересыщение по вакансиям. Это способствует ускорению низкотемпературной диффузии (в случае, если после закалки проводится старение).

Закаленный сплав, имеющий пересыщение по ряду элементов, обычно подвергается старению (температура искусственного старения $160 \div 190$ °С от 5 до 30 часов; естественное старение — при комнатной температуре).

При повышении температуры старения происходит перестаривание (рост частиц равновесной фазы). Результатом является снижение как предела текучести, так и временного сопротивления, а пластичность остается на низком уровне.

4.2.5. Способы обработки алюминиевых сплавов

Литейные процессы. К литейным процессам первого типа относится литье под давлением и в кокиль — заливка металла в металлическую форму из ковша. Второй тип — литье в песчаные и гипсовые формы. Используется также центробежное литье.

В процессе литья под давлением металл с высокой скоростью поступает в прессформу машины литья под давлением, мощность которой может достигать 3000 тонн. По сравнению с деталями, отливаемыми другими методами, отливки, получаемые литьем под давлением, имеют большую точность и однородность свойств при высоком качестве поверхности. Литье под давлением — самый экономичный метод при крупносерийном производстве.

Прессование, ковка, штамповка. Прессование — распространенный способ производства алюминиевых полуфабрикатов. Прессованием обрабатываются следующие алюминиевые сплавы: АД0, АД, АД33, Д16, АК8, АМц, АМг4, АМг5, В96. Используемый интервал температур прессования $290 \div 560$ °С ограничен сверху температурой, при которой появляются надрывы на поверхности, а снизу температурой, при которой уменьшается производительность пресса. Обычная скорость прессования составляет $60 \div 100$ м/мин. Высокопрочные сплавы прессуются со скоростью $0,5 \div 10$ м/мин. Гомогенизация слитков обычно позволяет увеличить скорость и уменьшить давление прессования.

Штамповка алюминиевых сплавов производится на стандартном оборудовании. Большинство изделий изготавливают этим способом за один ход пресса из отожженных деформированных или литых заготовок. Обычно процесс ведут при комнатной температуре со смазкой. Штамповкой обрабатываются сплавы АД, АМц, АК8, В95 и др.

Также хорошо штампуются термически упрочняемые сплавы средней прочности системы Al-Mg-Si.

Ковка — один из наиболее древних способов деформации алюминия. Многие алюминиевые сплавы лучше куется при продолжительном воздействии нагрузки (гидравлические прессы), чем при ударном воздействии (молот). Дляковки пригодны многие сплавы. Так, сплавы АК8, Д16, В95, В91 применяются чаще всего для изделий, от которых требуются максимальные прочностные свойства. Сплавы АД20, АК4-1 обладают высокой прочностью и после соответствующей термической обработки — максимальной стабильностью размеров в процессе работы при повышенных температурах. Поэтому их применяют для изготовления, например, авиационных двигателей. Там, где требуется высокая коррозионная стойкость, применяются сплавы АД35 и АВ.

Сварка алюминиевых сплавов. Сплавы на основе алюминия хорошо свариваются, при этом прочность сварного шва колеблется от 75 до 100 % от прочности основного металла. Основными способами сварки являются сварка плавлением (например, дуговая) и без оплавления (например, индукционная). При этом сварной шов образуется без трех самых распространенных видов дефектов сварного соединения: пористости, неметаллических включений и трещин.

4.2.6. Применение алюминиевых сплавов

Из алюминиевых сплавов изготавливают полуфабрикаты: листы, плиты, фольгу, проволоку, полосы, прессованные профили (уголки, двутавры, сложные профили, трубы прессованные, волоченые, сварные, штамповки и поковки для машиностроительной промышленности, гранулированные частицы, порошки, пудра).

Алюминий и его сплавы широко используются в строительстве благодаря внешнему виду, стойкости к атмосферным воздействиям, способности легко принимать требуемую форму, возможности нанесения покрытий и малой плотности при высокой прочности. Из алюминиевых сплавов изготавливаются окна, двери, облицовочные панели, декоративные перила, метизы, материал для крыш и т. д.

Большое распространение получили резервуары для хранения пищевых и химических продуктов из сплавов марки АД или АМц.

Для труб теплообменников и трубопроводов при транспортировке газовых смесей применяется сплав АМц с последующей термообработкой.

В ядерных реакторах в качестве экранов применяются листы и плиты сплава борал (сплав алюминия с бором). Большинство экранирующих материалов хорошо поглощают нейтроны, но при этом они испускают вторичное гамма-излучение высокой энергии, которое требует дальнейшего экранирования. Бор поглощает нейтроны без испускания вторичного излучения, поэтому при использовании листов из борала исключается часть потока вторичного гамма-излучения.

У алюминия и его сплавов не наблюдается переход из пластичного состояния в хрупкое и, следовательно, нет понижения вязкости при снижении температуры, что чрезвычайно важно для всевозможных конструкций. Обычно изделия, работающие при низких температурах, изготавливаются из алюминия промышленной чистоты, сплава АК8 (легирован медью), а в случае сварных конструкций — из сплава Д20 в закаленном и состаренном состоянии или АМц (легирован марганцем) и АМг4 (легирован магнием).

Низкая плотность алюминия имеет особое значение для деталей двигателя, движущихся возвратно-поступательно. Малая инерция способствует повышению скорости и КПД двигателя. Высокая теплопроводность алюминия — важное качество для термически нагруженных деталей, например, таких как поршни, блоки и головки цилиндров. Блоки цилиндров изготавливают обычно из сплава АЛ9, термически обрабатывают путем закалки и искусственного старения. Из такого же материала изготавливают корпуса коробок передач, картер маховика и т. д.

Широко используется алюминий в самолетостроении при изготовлении шасси, деталей турбин, внутренней отделки самолетов. Применяются сплавы В91, В95, ВАД23 в закаленном и искусственно состаренном состоянии.

В ракетах с жидкотопливным реактивным двигателем ни одно из топлив и ни один из окислителей не реагируют химически с алюминиевыми сплавами. В этих изделиях используются сплавы типа АМг2, АМг4, В95, В96, В91 в закаленном и состаренном состояниях.

В электротехнике используется физическое свойство алюминия — его высокая электропроводность. Так, сплавы алюминия с 0,7 % кремния и 0,75 % магния применяются для изготовления многожильных проводов линий электропередач.

Широко применяется алюминий для изготовления товаров народного потребления, пигментов для колеровки красок и т. д.

Особо следует отметить использование алюминия в металлургии, когда реализуется его сильное сродство к кислороду. Алюминотермия применяется для плавки металла в тех случаях, когда желательно избежать присутствия карбидов или силицидов в полученном сплаве. Методом алюминотермической плавки получают такие металлы, как барий, бор, кальций, цезий, хром, кобальт, магний, марганец, ферросплавы. Используется алюминий и в качестве легирующих добавок к сплавам. Алюминий является наиболее сильнодействующим раскислителем стали, обеспечивающим почти полное удаление растворенного кислорода. Одновременно алюминий способствует измельчению зерна стальных отливок.

4.2.7. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из алюминиевых сплавов

Обшивку фюзеляжа пассажирского самолета изготавливают из легкого сплава с пределом текучести не ниже 420 МПа. Привести состав выбранного сплава, технологию его обработки, структуру и свойства листа, а также способы повышения коррозионной стойкости изделий из этого сплава.

Решение. На современном этапе развития дозвуковой авиации алюминиевые сплавы являются основными конструкционными материалами в самолетостроении. Их применяют для изготовления силовых элементов самолета: обшивки, шпангоутов, лонжеронов, нервюр, топливных и масляных баков. В России при изготовлении авиационной техники успешно используются упрочняемые термической обработкой сплавы средней и повышенной прочности системы Al-Mg-Cu, прежде всего сплавы Д1 и Д16. Они являются конструкционным материалом для обшивки и внутреннего набора элементов планера самолета (фюзеляж, крыло, киль и др.). Химический состав сплавов и их механические свойства приведены в табл. 4.9, откуда видно, что по условиям задачи требованиям по прочности к материалу обшивки фюзеляжа пассажирского самолета удовлетворяет дуралюмин Д16. Этот сплав и следует выбрать для решения данной задачи.

Листы из дуралюмина после горячей прокатки подвергают полному или сокращенному отжигу обычно при температурах $350 \div 450$ °С для

снятия технологического наклепа, закалке и естественному старению в течение не менее 96 часов или искусственному старению в течение 7÷13 часов при температурах 185÷195 °С. Отличительная особенность термической обработки дуралюминов — необходимость жесткого соблюдения рекомендованной температуры нагрева под закалку в сухом горячем воздухе или защитной атмосфере. Допустимые колебания температуры нагрева под закалку высокопрочного дуралюмина Д16 очень невелики (495÷505 °С). Это связано с тем, что этот интервал температур нагрева для максимального растворения упрочняющих фаз очень близок к температуре солидуса. При закалке важно обеспечить высокую скорость охлаждения. Даже незначительный распад твердого раствора с выделением промежуточных интерметаллидных фаз по границам зерен, который влияет на механические свойства, обуславливает повышенную склонность листов к локальной коррозии вблизи границ зерен. Во избежание этого дуралюмины при закалке следует охлаждать в холодной воде при минимальном времени переноса нагретых изделий из печи в воду. Структура листа после окончательной термообработки представляет собой α -твердый раствор, упрочненный зонами Гинье-Престона или промежуточными стадиями его распада с метастабильными фазами типа Al_2CuMg .

Дуралюмины отличаются пониженной коррозионной стойкостью и нуждаются в специальных средствах защиты от коррозии. Наибольшее распространение в промышленности для листов получил способ плакировки дуралюмина техническим алюминием (А7, А8). Слитки дуралюмина с отфрезерованной поверхностью перед горячей прокаткой покрывают с обеих сторон планшетами из алюминия и в таком виде прокатывают. В результате получается лист, покрытый с обеих сторон тонким слоем (обычно около 4 % от толщины листа) алюминия. Плакировка защищает дуралюмин от коррозии не только механически, но и электрохимически.

4.3. Магниевые сплавы

Магний — серебристо-белый с сильным блеском металл, имеет гексагональную кристаллическую структуру, не обладает полиморфизмом.

Он относится к наиболее легким конструкционным металлам, его плотность равна $1,74 \text{ г/см}^3$ при 20°C , температура плавления составляет 651°C . По химическим свойствам магний относится к щелочно-земельным металлам.

На воздухе покрывается защитной оксидной пленкой; подожженная тонкая стружка и порошок магния горят ярким белым пламенем. Применяется главным образом в производстве легких сплавов, для раскисления и обессеривания некоторых металлов, для восстановления Hf, Ti, U, Zr и других металлов из соединений (металлотермия), используется как компонент осветительных и зажигательных составов.

По ГОСТ 804–93 установлены следующие марки магния: Mg96 (99,96 % магния, остальное — примеси), Mg95, Mg90. Примеси железа, кремния, никеля и меди снижают пластичность и коррозионную стойкость магния. При нагреве магний активно окисляется и при температуре 623°C воспламеняется на воздухе. Порошок, тонкие пластины и стружка магния могут самовозгораться на воздухе, что делает магний веществом чрезвычайно опасным в производстве.

Литой магний имеет крупнокристаллическую структуру и низкие механические свойства: $\sigma_B = 110 \div 120 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 20 \div 30 \text{ МПа}$; $\delta = 6 \div 8 \%$; 30 НВ. Модифицирование магния цирконием измельчает структуру и несколько улучшает механические свойства: $\sigma_B = 260 \text{ МПа}$; $\delta = 8,5 \div 9 \%$.

Хорошо растворяются в магнии соседние с ним по таблице Д. И. Менделеева металлы — такие как алюминий, индий, галлий, цинк. Так, например, в магнии максимальная растворимость алюминия может достигать 12,6 %, а цинка — 8,4 %.

К числу сравнительно сильных упрочнителей магния относятся иттрий, кремний, алюминий, цинк и марганец. Упрочняющее действие алюминия и цинка сохраняется лишь до температур $150 \div 200^\circ\text{C}$.

По влиянию на пластичность магния легирующие элементы можно разбить на две группы: а) элементы, уменьшающие пластичность (марганец, кремний); б) элементы, повышающие пластичность магния при их введении до определенной концентрации (Li, Zn, Al, Sc, Ce).

Сплавы магния, как и алюминиевые, по технологии производства из них полуфабрикатов и изделий разделяют на две основные группы:

— *деформируемые* сплавы, они используются для производства полуфабрикатов различными методами обработки давлением (обозначение — МА и номер сплава);

— *литейные* сплавы, которые предназначены для получения деталей методами фасонного литья (обозначение — МЛ и номер сплава).

По уровню прочности магниевые сплавы принято разделять на такие категории: а) малопрочные; б) средней прочности и в) высокопрочные сплавы. По плотности магниевые сплавы разбивают на легкие и сверхлегкие. К сверхлегким относятся сплавы, легированные литием (МА21, МА18), а к легким — все остальные. Сплавы магния с литием (МА18, МА21) — самые легкие конструкционные металлические материалы.

По чувствительности к упрочняющей термической обработке различают термически упрочняемые и термически неупрочняемые сплавы. Магниевые сплавы разделяют также на группы в зависимости от той системы, к которой они относятся по своему химическому составу.

4.3.1. Литейные магниевые сплавы

Химический состав многих литейных магниевых сплавов близок к составу деформируемых (табл. 4.10). Основные легирующие элементы в литейных сплавах — это алюминий, цинк, марганец, кремний, церий, цирконий, торий. Механические свойства наиболее распространенных литейных магниевых сплавов приведены в табл. 4.11.

Относительно лучшими литейными свойствами отличаются сплавы МЛ5 и МЛ6: малая линейная усадка, хорошая жидкотекучесть, меньшая склонность к образованию рыхлостей, чем у других магниевых сплавов. Структура этих сплавов представляет собой зерна твердого раствора, по границам которых располагаются неравновесные эвтектические кристаллы интерметаллидной фазы Mg_4Al_3 .

В процессе гомогенизации ($415 \div 420$ °С в течение $12 \div 24$ часов) неравновесные фазы почти полностью растворяются, и после охлаждения на воздухе остается твердый раствор с остатками нерастворившихся включений.

Литейные свойства сплава МЛ4 удовлетворительны, но он склонен к пористости и образованию темных оксидных включений (чернот).

Сплавы МЛ5 и МЛ6 в литом состоянии хрупки из-за значительного количества эвтектических включений γ -фазы, образующейся в результате неравновесной кристаллизации. Эти включения могут быть переведены в твердый раствор гомогенизацией. Гомогенизация (закалка)

приводит к повышению и прочностных и пластических свойств фасонных отливок. Прочностные свойства сплавов МЛ4, МЛ5 и МЛ6 можно дополнительно повысить искусственным старением.

Таблица 4.10

Химический состав магниевых литейных сплавов, %

| Система | Сплав | Основные компоненты, мас. % (магний остальное) | | | | | Прочие элементы |
|-------------|-------|---|----------|---------|---------|-------------|---------------------------------|
| | | Al | Mn | Zn | Zr | Cd | |
| Mg-Al-Zn-Mn | МЛ4 | 5,0÷7,0 | 0,15÷0,5 | 2,0÷3,0 | — | — | — |
| | МЛ5 | 7,5÷9,0 | 0,15÷0,5 | 0,2÷0,8 | — | — | — |
| | МЛ6 | 9,0÷10,2 | 0,1÷0,5 | 0,6÷1,2 | — | — | — |
| Mg-Zn-Zr | МЛ8 | — | — | 5,5÷6,6 | 0,7÷1,1 | 0,2÷ 0,8 | — |
| | МЛ12 | — | — | 4,0÷5,0 | 0,6÷1,1 | — | — |
| | МЛ15 | — | — | 4,0÷5,0 | 0,7÷1,1 | — | (0,6÷1,2) La |
| | МЛ17 | — | — | 7,8÷9,2 | 0,7÷1,1 | 0,2÷ 1,2 | (0,03÷0,3) Nd |
| | МЛ18 | — | — | 7,0÷8,0 | 0,7÷1,1 | 0,4÷ 1,0 | (1,0÷1,6) Ag |
| Mg-PЗМ-Zr | МЛ9 | — | — | — | 0,4÷1,0 | — | (1,9÷2,6) Nd; (0,2÷0,8)In |
| | МЛ10 | — | — | 0,1÷0,7 | 0,4÷1,0 | — | (2,2÷2,8) Nd |
| | МЛ11 | — | — | 0,2÷0,7 | 0,4÷1,0 | — | (2,5÷4,0) PЗМ |
| | МЛ19 | — | — | 0,1÷0,6 | 0,4÷1,0 | — | (1,6÷2,3) Nd; (1,4÷2,2)Y |

Сплавы второй группы, относящиеся к системе Mg-Zn-Zr, по сравнению со сплавами системы Mg-Al-Zn обладают следующими преимуществами:

1) более высокими прочностными характеристиками; 2) малой чувствительностью механических свойств отливок к толщине сечения; 3) более высоким отношением предела текучести к временному сопротивлению разрыву; 4) меньшей чувствительностью механических свойств к влиянию микрорыхлости.

Таблица 4.11

**Механические свойства и предельные рабочие температуры
литейных магниевых сплавов**

| Система | Марки сплавов | Режим термической обработки* | Механические свойства, не менее | | Предельные рабочие температуры, °С |
|-----------|---------------|------------------------------|---------------------------------|--------------|------------------------------------|
| | | | σ_B , МПа | δ , % | |
| Mg-Al-Zn | МЛ4 | — | 160 | 3 | — |
| | МЛ4пч | T4 | 220 | 5 | 150 |
| | МЛ5 | — | 150 | 2 | — |
| | МЛ5пч | T4 | 230 | 5 | 150 |
| | МЛ6 | T4 | 220 | 4 | 150 |
| Mg-Zn-Zr | МЛ8 | T61 | 280 | 4 | 150 |
| | МЛ12 | T1 | 230 | 5 | 200 |
| | МЛ15 | T1 | 210 | 3 | 200 |
| | МЛ17 | T61 | 300 | 3 | 150 |
| | МЛ18 | T61 | 340 | 6 | 150 |
| Mg-PЗМ-Zr | МЛ9 | T6 | 250 | 6 | 250 |
| | МЛ10 | T6 | 250 | 5 | 250 |
| | МЛ11 | T6 | 160 | 3 | 250 |
| | МЛ19 | T6 | 250 | 5 | 300 |

* Режимы термической обработки: T1 — искусственное старение без предварительной закалки; T4 — закалка; T6 — закалка на воздухе и старение; T61 — закалка в воде и старение.

Типичный представитель этой группы сплавов — сплав МЛ12. Он отличается высокой прочностью, большой коррозионной стойкостью, лучшими литейными свойствами. Сплав термически упрочняется путем закалки от 400 °С и искусственного старения при 150 °С в течение 50 ч.

Сплав МЛ15 отличается от сплава МЛ12 дополнительным легированием лантаном, который повышает жаропрочные свойства, улучшает свариваемость, уменьшает склонность к образованию микрорыхлостей и горячих трещин. Сплав термически упрочняется старением при 300 °С в течение 6 ч.

Сплавы этой группы МЛ8, МЛ17 и МЛ18 дополнительно легированы кадмием, кадмием и неодимом, кадмием и серебром соответственно. Кадмий повышает механические свойства и улучшает технологи-

ческую пластичность сплавов системы Mg-Zn-Zr, а неодим и серебро увеличивают прочностные характеристики.

Сплавы третьей группы МЛ9, МЛ10, МЛ11, МЛ19, относящиеся к системе Mg-РЗМ-Zr, отличаются высокой жаропрочностью.

Основной легирующий элемент в сплавах МЛ9, МЛ10 — неодим; в сплаве МЛ19 — неодим, иттрий, а в МЛ11 — цериевый мишметалл (75 % Се, остальное — РЗМ). Сплавы на основе системы Mg-Nd (МЛ9, МЛ10) отличаются высокими механическими свойствами при комнатной температуре, высокой жаропрочностью, хорошими литейными и технологическими свойствами. Сплав МЛ19 этой системы относится к наиболее жаропрочным сплавам на основе магния.

Термическая обработка магниевых и алюминиевых сплавов имеет много общего, что объясняется отсутствием полиморфных превращений в этих металлах и близостью температур плавления.

4.3.2. Деформируемые магниевые сплавы

Химический состав основных промышленных деформируемых магниевых сплавов приведен в табл. 4.12. При этом по основным легирующим элементам деформируемые магниевые сплавы подразделяют на несколько групп.

Основные показатели механических свойств этих сплавов приведены в табл. 4.13.

К первой группе относятся сплавы, в которых основным легирующим элементом является марганец. Он не образует с магнием соединений и присутствует в чистом виде. Сплавы системы Mg-Mn термической обработкой не упрочняются, как и сплавы системы Al-Mn. Основная цель легирования магния марганцем — это улучшение коррозионной стойкости и свариваемости.

Большое распространение получил сплав МА8, относящийся к системе Mg-Mn-Се. Этот сплав отличается высокой технологической пластичностью, средней прочностью, высокой коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью. Из него получают плиты, листы, штамповки, профили и трубы.

Вторая группа деформируемых магниевых сплавов относится к многокомпонентной системе Mg-Al-Zn-Mn. Сплавы системы Mg-Al-Zn склонны к коррозии под напряжением. Коррозионная стойкость спла-

вов системы Mg-Al-Zn тем ниже, чем больше содержание алюминия. Цинк не влияет на коррозионную стойкость магниевых сплавов, а марганец ее повышает.

Таблица 4.12

Химический состав магниевых деформируемых сплавов, мас. %

| Система | Сплав | Al | Mn | Zn | РЗМ | Прочие элементы |
|-------------|-------|---------|----------|---------|---------------|-----------------------------|
| Mg-Mn | MA1 | — | 1,3÷2,5 | — | — | — |
| | MA8 | — | 1,3÷2,2 | — | (0,15÷0,35)Ce | — |
| Mg-Al-Zn-Mn | MA2 | 3,0÷4,0 | 0,15÷0,5 | 0,2÷0,8 | — | — |
| | MA2-1 | 3,8÷5,0 | 0,3÷0,7 | 0,8÷1,5 | — | — |
| | MA3 | 5,5÷7,0 | 0,15÷0,5 | 0,1÷1,5 | — | — |
| | MA5 | 7,8÷9,2 | 0,15÷0,5 | 0,2÷0,8 | — | — |
| Mg-Zn-Zr | MA14 | — | — | 5,0÷6,0 | — | (0,3÷0,9)Zr |
| | MA15 | — | — | 2,5÷3,5 | (0,7÷1,1)La | (1,2÷2,0)Cd (0,45÷0,9)Zr |
| | MA19 | — | — | 5,5÷7,0 | (1,4÷2,0)Nd | (0,2÷1,0)Cd (0,5÷0,9)Zr |
| | MA20 | — | — | 1,0÷1,5 | (0,12÷0,2)Ce | (0,05÷0,12)Zr |
| Mg-РЗМ | MA12 | — | — | — | (2,5÷3,5)Nd | (1,2÷2,0)Cd (0,3÷0,8)Zr |
| Mg-Y-Cd | ВМД10 | — | 0,4÷0,6 | — | (0,05÷0,15)Ce | (7,8÷9,0)Y (0,2÷0,5)Cd |
| Mg-Li | MA21 | 0,4÷6,0 | 1,0÷0,4 | 0,8÷2,0 | — | (3,0÷5,0)Cd (7,0÷9,0)Li |
| | MA18 | 0,5÷1,0 | 0,1÷0,4 | 2,0÷2,5 | (0,15÷0,35)Ce | (10,0÷11,5)Li |

К наиболее распространенным сплавам системы Mg-Al-Zn-Mn относятся MA2-1 и MA2-1пч (повышенной чистоты). Сплав MA2-1 отличается от сплава MA8 большей прочностью; в то же время он обладает высокой технологичностью. Сплав легко прокатывается, поддается всем видам листовой штамповки. В отличие от других сплавов системы Mg-Al-Zn-Mn сплав MA2-1 хорошо сваривается. Он термически не упрочняется и поставляется в отожженном, деформированном или горячекатаном состоянии. Сплав MA2-1пч отличается от MA2-1 более высокой коррозионной стойкостью и лучшей свариваемостью.

Третья группа деформируемых магниевых сплавов MA14, MA15, MA19, MA20 принадлежит к тройной системе Mg-Zn-Zr. Сплавы этой группы отличаются высокими механическими свойствами, что обу-

словлено упрочняющим действием цинка в сочетании с модифицирующим действием циркония. Цирконий повышает прочность и пластичность магния, улучшает также коррозионную стойкость. Кроме того, легирование цирконием измельчает зерно, что также вызывает улучшение технологической пластичности. К рассматриваемой системе принадлежит наиболее прочный промышленный сплав МА19. Технологичность этого сплава невысока, он плохо сваривается аргонодуговой сваркой, но хорошо контактной.

Таблица 4.13

Механические свойства прессованных полуфабрикатов

| Система | Сплав | Механические свойства*) | | | Предельные рабочие температуры, °С |
|-------------|-------|-------------------------|----------------------|--------------|------------------------------------|
| | | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | |
| Mg-Mn | МА1 | 240÷260 | 130÷140 | 5÷6 | 150 |
| | МА8 | 240÷260 | 120÷150 | 7÷12 | 200 |
| Mg-Al-Zn-Mn | МА2 | 260÷280 | 160÷180 | 10÷12 | 150 |
| | МА2-1 | 260÷280 | 160÷180 | 12 | 150 |
| | МА3 | 300 | 240 | 12 | 150 |
| | МА5 | 310 | 220 | 8 | 150 |
| Mg-Zn-Zr | МА14 | 340÷350 | 290÷300 | 9÷10 | 125 |
| | МА15 | 300÷320 | 250÷260 | 6÷14 | 150 |
| | МА19 | 380÷400 | 330÷360 | 5÷8 | 150 |
| | МА20 | 240÷260 | 140÷180 | 15÷20 | 150 |
| Mg-PЗМ | МА12 | 270 | 130÷160 | 6÷14 | 200 |
| Mg-Y-Cd | ВМД10 | 300÷330 | 240÷270 | 7÷17 | 300 |
| Mg-Li | МА18 | 150÷220 | 100÷180 | 15÷40 | Нет данных |

*) Свойства в продольном направлении.

Сплав МА14 подвергают искусственному старению после горячей обработки давлением, что позволяет повысить временное сопротивление разрыву на 20÷40 МПа, а предел текучести на 40÷50 МПа; относительное удлинение при этом падает в 1,5÷2 раза.

Четвертая группа представлена магниевыми сплавами, в которых главными легирующими элементами являются РЗМ. К сплавам рассматриваемой группы принадлежит МА12 (см. табл. 4.11). Основной легирующий элемент в этом сплаве — неодим (2,5÷3,5%). Этот элемент обеспечивает высокую жаропрочность. В сплавах магния с РЗМ

марганец и никель существенно повышают их сопротивление ползучести, длительную прочность и в меньшей степени временное сопротивление разрыву.

По временному сопротивлению разрыву при комнатной температуре сплав МА12 относится к сплавам средней прочности (см. табл. 4.11), но его прочностные свойства с повышением температуры снижаются менее интенсивно, чем у других деформируемых магниевых сплавов. Сплав МА12 термически упрочняется.

К этой же группе относятся сплавы, легированные иттрием, в частности ВМД10. Этот сплав относится к системе Mg-Y-Cd и причисляется к высокопрочным магниевым сплавам. Полуфабрикаты из этого сплава по уровню механических свойств превосходят широко распространенные серийные магниевые сплавы.

Пятую группу деформируемых магниевых сплавов составляют сплавы системы Mg-Li. Легирование магния еще более легким металлом литием с плотностью всего $0,53 \text{ г/см}^3$ приводит к значительному уменьшению их плотности. Легирование магния литием позволяет создать сплавы с плотностью $1,3 \div 1,6 \text{ г/см}^3$, что приводит к значительному увеличению удельных характеристик механических свойств.

Сплавы системы Mg-Li в зависимости от фазового состава делят на три группы: α (до 5,7 % Li), $\alpha + \beta$ (5,7 ÷ 10,3 % Li) и β (Li > 10,3 %).

Из сплавов этой группы наибольший интерес представляют α -сплав МА18 и $(\alpha + \beta)$ -сплав МА21. Сплав МА18 отличается самой малой плотностью ($1,5 \text{ г/см}^3$) среди магниевых сплавов. Он обладает высокой пластичностью и ударной вязкостью, превосходной технологичностью; листовая штамповка, гибка, вытяжка могут производиться в холодном состоянии. Сплав МА21 отличается от сплава МА18 более высокими прочностными характеристиками, большей коррозионной стойкостью.

4.3.3. Термическая обработка магниевых сплавов

Рассмотрим наиболее важные режимы термообработки магниевых сплавов.

Гомогенизационный отжиг. Магниевые сплавы, как и алюминиевые, подвергают гомогенизации для устранения дендритной ликвации и соответственно повышения технологичности при горячей обработке давлением. Низкие скорости диффузионных процессов в твердом

магнии приводят в условиях неравновесной кристаллизации к сильному развитию дендритной ликвации (даже при малых скоростях охлаждения). Поэтому перед деформацией сплавы подвергают гомогенизационному отжигу.

Рекристаллизационный отжиг. Он понижает прочность, но повышает пластичность магниевых сплавов и в значительной мере устраняет анизотропию свойств полуфабрикатов в продольном и поперечном направлениях. Температура начала рекристаллизации чистого магния равна примерно 150 °С, а магниевых сплавов — 250÷280 °С. Поэтому отжиг магниевых сплавов обычно проводят при температурах, близких к 350 °С.

Отжиг для снятия остаточных напряжений. Эту обработку проводят при более низких температурах, чем используемых для рекристаллизации, сразу же после технологической обработки, создающей остаточные напряжения (деформация).

Закалка и старение. Указанные операции применяются для повышения прочностных свойств. Критические скорости охлаждения невысоки, и фиксация гомогенного состояния, соответствующего температуре нагрева под закалку, происходит уже при охлаждении на воздухе. Лишь для некоторых сплавов необходимо охлаждение струями воздуха или подогретой водой.

Закалка приводит к существенному повышению прочностных, а иногда и пластических свойств сплавов, особенно литейных.

Естественного старения для большинства магниевых сплавов после закалки не происходит. Поэтому их подвергают искусственному старению, продолжительность которого значительно больше, чем для алюминиевых. Искусственное старение магниевых сплавов повышает прочностные свойства закаленного материала, но эффект упрочнения сплавов систем Mg-Al и Mg-Al-Zn сравнительно невелик (25÷35 %).

Упрочнение при старении сплавов систем Mg-Nd и Mg-Nd-Mn-Ni, наоборот, весьма значительно.

Магниевые сплавы применяют главным образом как жаропрочные материалы, поэтому температура старения должна быть выше рабочих температур данного сплава с тем, чтобы в условиях эксплуатации не происходило слишком быстрой коагуляции упрочняющих фаз.

Поскольку повышение прочностных характеристик магниевых сплавов при закалке по сравнению со свойствами отожженного или литого металла весьма велико, а старение не вносит значительного

дополнительного упрочнения, магниевые сплавы часто подвергают только закалке, а фасонные отливки — гомогенизации с охлаждением на воздухе. В табл. 4.14 приведены условные обозначения видов термической обработки изделий и обработки изделий и полуфабрикатов из магниевых сплавов.

Таблица 4.14

Условные обозначения режимов термической обработки

| Условное обозначение | Вид термической обработки | Назначение |
|----------------------|--|---|
| T1 | Искусственное старение без предварительной закалки | Повышение механических свойств сплавов |
| T2 | Отжиг | Снятие остаточных напряжений и наклепа |
| T4 | Закалка | Повышение прочностных характеристик |
| T6 | Закалка на воздухе и старение | Повышение прочности при некотором снижении относительного удлинения |
| T61 | Закалка в воде и старение | Максимальное повышение прочности литых деталей |

При термической обработке магниевые сплавы взаимодействуют с газами, составляющими атмосферу печи, поэтому при нагреве используют только электрические печи. В результате реакции с кислородом образуется окись магния MgO . Это соединение имеет существенно меньший объем, чем металл, поэтому магний должен сравнительно быстро окисляться. Тем не менее до температур $450 \div 475$ °C окисная пленка оказывает защитное действие.

Литейные магниевые сплавы подвергают термической обработке для повышения механических свойств (закалка и старение) и уменьшения остаточных напряжений (отжиг T2). Для уменьшения окисления нагрев проводят в нейтральной атмосфере углекислого газа, аргона и т. п. или в воздушной атмосфере с добавкой $0,5 \div 1$ % SO_2 .

Время выдержки при температуре нагрева под закалку колеблется в широких пределах и зависит от состава сплава, толщины стенки сечения и структуры отливок. Закалка литейных магниевых сплавов приводит к существенному повышению механических свойств, особенно

в сплавах системы Mg-Al-Zn. Поэтому ее часто проводят без последующего старения (режим Т4). Охлаждение после нагрева под закалку проводят в спокойном воздухе. Для интенсификации охлаждения при закалке некоторых сплавов применяют также обдувку струями воздуха или охлаждение в подогретой до $80\div 95$ °С воде.

Искусственное старение проводят в печах с воздушной атмосферой, а охлаждение — на спокойном воздухе. Процессы распада при старении сопровождаются объемными эффектами, вызывающими изменение размеров отливок.

В целях повышения технологической пластичности при обработке давлением слитки магниевых сплавов подвергают гомогенизационному отжигу. Рекомендуемые режимы гомогенизации для некоторых промышленных сплавов приведены в табл. 4.15.

Температуры начала и конца рекристаллизации деформируемых магниевых сплавов составляют соответственно $150\div 300$ °С и $200\div 400$ °С в зависимости от состава и чистоты сплавов и условий деформации.

Таблица 4.15

Режимы гомогенизации магниевых сплавов

| Марка сплава | I ступень нагрева | | II ступень нагрева | |
|--------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | температура, °С | время выдержки, ч | температура, °С | время выдержки, ч |
| МА1 | 490 | 12 | — | — |
| МА2 | 400 | 18 | — | — |
| МА2-3 | 390 | 10 | 420 | 8 |
| МА3 | 340 | 4 | 400 | 12 |
| МА8 | 490 | 12 | — | — |
| МА11 | 490 | 24 | — | — |
| МА12 | 530 | 24 | — | — |

Поскольку эффект упрочнения магниевых сплавов при старении невелик, то наиболее распространенными видами термической обработки полуфабрикатов из магниевых сплавов являются высокотемпературный (рекристаллизационный) и низкотемпературный (для снятия напряжений) отжиги, а также закалка.

Малая плотность магниевых сплавов в сочетании с высокой удельной прочностью и рядом физико-химических свойств делает их ценными для применения в различных областях машиностроения: са-

молетостроении, космической, автомобильной, приборостроении, радиотехнике и других областях.

Из всего производимого магния большая его часть идет на получение титана магниетермическим способом; второе место занимает потребление магния на легирование алюминиевых сплавов как раскислителя и модификатора и лишь третья, сама малая его часть, расходуется на производство конструкционных материалов. Чистый магний обладает недостаточно высоким комплексом механических свойств, поэтому в технике используют в основном магниевые сплавы.

Магниевые сплавы обладают высокой удельной прочностью, хорошо поглощают вибрацию, что определило их широкое использование в авиационной технике. Недостатками магниевых сплавов являются низкий модуль нормальной упругости (до 43000 МПа), трудность обработки давлением и плохие литейные свойства.

В самолетостроении из магниевых сплавов изготавливают колеса и вилки шасси, различные рычаги, корпуса приборов, насосов, корбок передач, фонари и двери кабин, детали планера самолета. Магниевые сплавы успешно используют в конструкциях вертолетов.

Магниевые сплавы нашли также применение в конструкции автомобилей, особенно гоночных (колеса, картеры, крышки, маслопомпы); в приборостроении (корпуса и детали приборов, биноклей).

Магний не взаимодействует с ураном и обладает низкой способностью поглощать тепловые нейтроны. Поэтому магниевые сплавы применяют для изготовления трубчатых тепловыделяющих элементов в ядерных реакторах.

4.3.4. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из магниевых сплавов

Детали планера и фрагменты самолетов (двери, фонари, обтекатели, передние кромки крыльев, топливные баки) изготавливают из сплава с минимальной плотностью. Этот сплав должен иметь высокую пластичность в горячем состоянии, стойкость против коррозии, а также допускать сварку длинных швов в случае использования для изготовления топливных баков. Рекомендовать состав сплава и назначить технологию его обработки, привести данные о физико-механических свойствах.

Решение. Магниевые сплавы вследствие высокой удельной прочности широко применяются в самолетостроении для указанных в задаче деталей.

Учитывая эксплуатационные требования к материалу, наиболее подходящими для этих целей можно считать сплавы средней прочности, в которых основным легирующим элементом является марганец, придающий сплавам повышенную коррозионную стойкость и свариваемость, а из этой группы — сплавы МА2, МА2-1, МА8 (табл. 4.10). Эти сплавы отличаются высокой технологической пластичностью, высокой коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью. Из них получают плиты, листы, штамповки, профили и трубы.

Из трех указанных сплавов для решения задачи целесообразно выбрать сплав МА2-1 пч (повышенной чистоты). Он отличается от сплава МА8 большей прочностью; в то же время обладает высокой технологичностью. Сплав легко прокатывается, поддается всем видам листовой штамповки. В отличие от других сплавов системы Mg-Al-Zn-Mn сплав МА2-1 хорошо сваривается. Он термически не упрочняется и поставляется в отожженном, деформированном или горячекатаном состоянии. Сплав МА2-1пч отличается от МА2-1 более высокой коррозионной стойкостью и лучшей свариваемостью.

4.4. Титановые сплавы

По распространенности среди конструкционных материалов титан занимает четвертое место после алюминия, железа и магния. В земной коре его содержится порядка 0,6 %.

Чистый титан — это металл серого цвета, он обладает малой плотностью ($4,5 \text{ г/см}^3$), имеет временное сопротивление $\sigma_B = 270 \text{ МПа}$, относительное удлинение $\delta = 55 \%$. С уменьшением чистоты титана (марки ВТ1-00, ВТ1-0, ВТ1-1) прочностные свойства повышаются ($\sigma_B = 300 \div 550 \text{ МПа}$); пластичность падает ($\delta_5 = 15 \div 25 \%$). У сплавов на основе титана σ_B находится в пределах $800 \div 1400 \text{ МПа}$. Титановые сплавы относятся к конструкционным материалам с высокой удельной прочностью.

Титан является химически активным металлом, но на воздухе быстро покрывается защитной пленкой плотных окислов, благодаря

чему приобретает высокую стойкость в атмосфере, воде, органических и неорганических кислотах.

Температура плавления титана равна 1668 °С. Он является полиморфным элементом и существует в двух аллотропических модификациях, различающихся по структуре атомной решетки. Ниже температуры полиморфного превращения 882 °С титан существует в виде низкотемпературной модификации α , имеющей гексагональную плотноупакованную решетку, а выше этой температуры в виде модификации β с кубической объемноцентрированной решеткой.

Сплавы титана принято маркировать следующим образом: указываются буквы ВТ или ОТ, за которыми следует число, соответствующее номеру сплава.

На рис. 4.5 показано качественное влияние легирующих элементов на температуру полиморфного превращения титана. По влиянию на полиморфизм титана элементы разделяются на следующие группы.

1. К *первой группе* принадлежат α -стабилизаторы — элементы, повышающие температуру полиморфного превращения. Из металлов к числу α -стабилизаторов относится в первую очередь алюминий. Аналогичным образом влияют галлий и индий, из неметаллов — углерод, азот и кислород.

2. *Вторая группа* представлена β -стабилизаторами — элементами, понижающими температуру полиморфного превращения титана. Типичным примером таких элементов являются молибден, ванадий, вольфрам, ниобий, тантал. При этом из этой группы принято выделять элементы (хром, марганец, железо, медь, никель), которые вызывают эвтектоидный распад β -фазы по реакции $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$ (TiMe).

3. *Третью группу* образуют легирующие элементы, мало влияющие на полиморфизм титана. К числу таких элементов относятся олово, цирконий, германий, гафний и торий. Эти элементы называют нейтральными упрочнителями.

При медленном охлаждении титана ниже 882 °С происходит превращение β -Ti (ОЦК) \rightarrow α -Ti (ГПУ) путем образования центров зарождения и их роста. При быстром охлаждении (закалке) превращение β -Ti \rightarrow α -Ti происходит по сдвиговому механизму, типичному для мартенситного превращения. При этом образуется игольчатая структура — мартенсит (его обозначают как α -фаза) — с несколько искаженной ГПУ-решеткой.

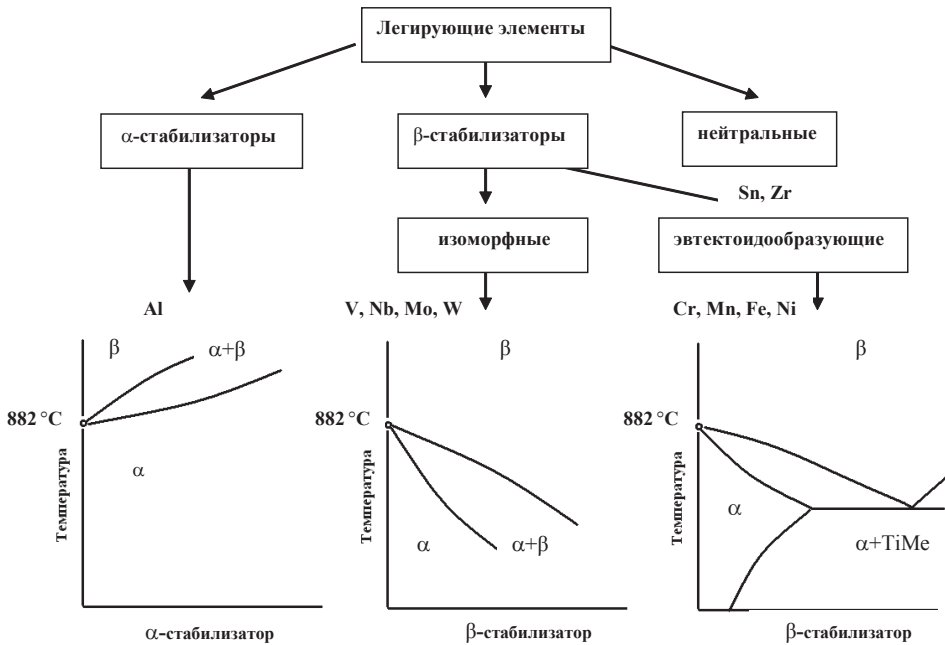


Рис. 4.5. Схема влияния легирующих элементов на полиморфизм титана

Образование мартенсита при закалке титановых сплавов по сравнению с закалкой стали сопровождается относительно невысоким ростом прочностных свойств. В то же время титановые сплавы с мартенситной структурой обладают весьма высокой пластичностью. Это различие в свойствах железных и титановых сплавов объясняется разной природой пересыщенных фаз: для углеродистой стали мартенсит — пересыщенный твердый раствор типа внедрения, у титановых сплавов — типа замещения.

Сплавы титана могут обладать двухфазной ($\alpha + \beta$) структурой.

Существует несколько классификаций промышленных титановых сплавов. По технологии изготовления титановые сплавы подразделяют на литейные, деформируемые, по механическим свойствам — на сплавы нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности. По способности упрочняться с помощью термической обработки они делятся на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой, по структуре в отожженном состоянии — на α -, псевдо- α -, ($\alpha + \beta$)-, псевдо- β и β -сплавы (термин «псевдо» означает, что помимо указанной фазы в структуре присутствует крайне незначительное количество другой фазы).

4.4.1. Литейные титановые сплавы

Особенность маркировки литейных сплавов титана: в конце принято ставить букву Л.

Специальные титановые литейные сплавы имеют хорошие литейные свойства. Небольшой температурный интервал кристаллизации обеспечивает им высокую жидкотекучесть и хорошую плотность отливки. Они обладают малой склонностью к образованию горячих трещин и небольшой усадкой ($1 \div 3 \%$).

К недостаткам литейных титановых сплавов относятся большая склонность к поглощению газов и высокая активность при взаимодействии с формовочными материалами, поэтому их плавку и разливку ведут в вакууме или в среде нейтральных газов.

Литейные сплавы обладают более низкими механическими свойствами, чем соответствующие деформируемые. Упрочняющая термическая обработка резко снижает пластичность литейных титановых сплавов и поэтому не применяется.

Трудности производства фасонных отливок из титана обусловлены его высокими скоростями взаимодействия со всеми известными сейчас формовочными и огнеупорными материалами, а также с газами. Поэтому высокие литейные свойства титана и его сплавов удалось реализовать лишь после разрешения ряда технологических трудностей.

Для фасонного литья применяют титан и его сплавы: ВТ1Л, ВТ14Л, ВТ21Л, ВТ5Л, ВТ3-1Л (табл. 4.16). По составу сплавы ВТ5Л, ВТ14Л и ВТ3-1Л совпадают с деформируемыми сплавами ВТ5, ВТ14 и ВТ3-1. Сплав ВТ1Л описывается системой Ti-Al-Si, а сплав ВТ21Л относится к многокомпонентной композиции типа Ti-Al-Zr-Mo-Cr.

Наиболее широко применяется сплав ВТ5Л, что обусловлено высокими литейными свойствами, простой технологией получения из него отливок, распространенностью и недефицитностью единственного в нем легирующего элемента — алюминия, высокой пластичностью и ударной вязкостью отливок. Структура сплава ВТ5Л представлена крупными зернами α -фазы. Предел прочности отливок при 20°C составляет $700 \div 900$ МПа, предел текучести $630 \div 750$ МПа, относительное удлинение $6 \div 13 \%$, относительное поперечное сужение $14 \div 25 \%$, ударная вязкость $0,3 \div 0,7$ МДж/м². Сплав не склонен к образованию горячих трещин, хорошо сваривается. Сплав предназначен для фасонных

отливок, длительно работающих при температурах до 400 °С. Недостаток его — относительно невысокая прочность ($\sigma_B=700$ МПа).

Таблица 4.16

**Химический состав и механические свойства литейных титановых сплавов
в отожженном состоянии**

| Химический состав, мас. % | | | | | | Механические свойства в отожженном состоянии | | |
|---------------------------|-----|--------|-----|-----|-----------------|--|--------------|----------------------------|
| Марка | Al | Mn | V | Mo | Прочие | σ_B , МПа | δ , % | a_n , МДж/м ² |
| Ti | — | — | — | — | — | 450 | 15 | 0,5 |
| BT5Л | 5 | — | — | 2 | 2Cr, 0,2Si | 700 | 6 | 0,3 |
| BT3-1Л | 5,5 | 2Cr | — | 2 | 0,2Si | 1050 | 5 | 0,35 |
| BT14Л | 5,5 | 0,4 | 1 | 3 | 0,4Cr, 0,4Fe | 900 | 4 | 0,2 |
| BT21Л | 6,6 | 0,35Cr | 1,2 | 0,7 | 0,35Fe, 5Zr | 1000 | 4 | 0,2 |
| BT1Л | 5 | — | — | — | 1Si | 850 | 5 | 0,15 |

Сплав BT1Л отличается от BT5Л большей прочностью ($\sigma_B=850$ МПа), но меньшей ударной вязкостью. Он хорошо сваривается. Структура сплава BT1Л представлена зернами α -фазы и интерметаллидами.

Сплав BT21Л, относящийся по структуре к псевдо- α -сплавам, более прочен, чем описанные выше сплавы, но имеет меньшую пластичность и жидкотекучесть. По прочности при комнатной и повышенных температурах он уступает только сплаву BT3-1Л. Структура отливок из этого сплава представлена крупными макрозернами с пластинчатыми α -зернами внутри них. Сплав удовлетворительно сваривается.

Сплав BT14Л по химическому составу отличается от сплава BT14 большим содержанием алюминия и дополнительным легированием железом и хромом. Отливки из этого сплава отжигают при 850 °С с последующим охлаждением с печью со скоростью 2÷4 град/мин, после чего он приобретает структуру, представленную α - и β -фазами. Упрочняющую термическую обработку для сплава BT14Л не применяют, так как это приводит к резкому снижению пластичности отливок. Литейные свойства сплава BT14Л хуже, чем литейные свойства сплава BT5Л.

Наиболее прочный промышленный литейный сплав BT3-1Л, но его пластичность и жидкотекучесть ниже, чем у сплавов BT1Л и BT5Л. Структура отливок из сплава BT3-1Л представлена фазами α , β и α' ,

дисперсность которых зависит от условий охлаждения, в частности от габаритов отливки. Сплав характеризуется высокой термической стабильностью и жаропрочностью. Фасонные отливки из сплава ВТЗ-1Л могут длительно работать при температуре до 450 °С.

4.4.2. Деформируемые титановые сплавы

Химический состав и наиболее важные механические свойства распространенных деформируемых титановых сплавов приведены в табл. 4.17.

Таблица 4.17

Химический состав и механические свойства деформируемых титановых сплавов

| Марка | Химический состав, мас. % | | | | Механические свойства | | |
|-------|---------------------------|---|----|--------|-----------------------|--------------|----------------------------|
| | Al | V | Mo | Прочие | σ_B , МПа | δ , % | a_n , МДж/м ² |

α - и псевдо- α -титановые сплавы (отожженное состояние)

| | | | | | | | |
|-------|---------|---------|---------|------------------------------|----------|-------|---------|
| ВТ4 | 4 | — | — | 1,5 Mn | 850÷1050 | 10÷15 | 0,5÷1,0 |
| ВТ5 | 4,3÷6,2 | — | — | — | 700÷950 | 10÷15 | — |
| ВТ5-1 | 4,3÷6,0 | — | — | 2÷3 Sn | 750÷950 | 10÷15 | — |
| ОТ4-1 | 1,0÷2,5 | — | — | 0,7÷2,0 Mn | 600÷750 | 20÷40 | — |
| ОТ4 | 3,5÷5,0 | — | — | 0,8÷2,0 Mn | 700÷900 | 12÷20 | — |
| ВТ18 | 7,2÷8,2 | — | 0,2÷1,0 | 0,3 Si 3,5÷4,5 Zr 1 Nb | 1100 | 9 | 0,2÷0,4 |
| ВТ20 | 5,5÷7,0 | 0,8÷2,3 | 0,5÷1,8 | 1,4÷2,5 Zr | 950÷1150 | 8 | — |

α + β титановые сплавы (после закалки и старения)

| | | | | | | | |
|------|---------|---------|-----|--------------------------|-----------|---------|---------|
| ВТ6 | 5,3÷6,8 | 4,2÷6,0 | — | — | 950÷1100 | более 8 | 0,4÷0,8 |
| ВТ9 | 5,8÷7,0 | 0,2 Si | 3,5 | 0,2 Fe 2 Zr 0,2 Si | 1100÷1300 | 8÷14 | 0,2÷0,5 |
| ВТ16 | 1,8÷3,8 | 4,5 | 4,5 | — | 1250÷1450 | 4÷6 | 0,4÷0,6 |

β -титановые сплавы (отожженное состояние)

| | | | | | | | |
|-------|---------|---------|---------|------------|-----------|------|---|
| ВТ15 | 2,3÷3,6 | — | 6,8÷8 | — | 1300÷1500 | 6 | — |
| ВТ22* | 4,0÷5,7 | 4,0÷5,5 | 4,0÷5,5 | 0,5÷1,5 Fe | 1300÷1600 | 4÷12 | 3 |

* Отожженное состояние

К сплавам с α -структурой относятся сплавы титана с алюминием (BT5), а также сплавы, дополнительно легированные оловом или цирконием (BT5-1). Они характеризуются средней прочностью при 20 °С, высокими механическими свойствами при повышенных (450÷500 °С) температурах. Сплавы обладают отличной свариваемостью. Прочность сварного шва составляет 90 % от прочности основного сплава. Обрабатываемость резанием удовлетворительная.

Недостатки сплавов: неупрочняемость термической обработкой и низкая технологическая пластичность. Сплавы с оловом более технологичны, но они самые дорогие из α -сплавов. В горячем состоянии сплавы куят, прокатывают и штампуют.

Псевдо α -сплавы имеют преимущественно α -структуру и небольшое количество β -фазы (1÷5 %) вследствие дополнительного легирования β -стабилизаторами: Mn, V, Nb, Mo и др. Сохраняя достоинства α -сплавов, стабилизаторы, благодаря наличию β -фазы, обладают высокой технологической пластичностью. Сплавы с низким содержанием алюминия (2÷3 %) обрабатываются давлением в холодном состоянии и только при изготовлении сложных деталей подогреваются до 500÷700 °С (OT4, OT4-1). Сплавы с большим содержанием алюминия при обработке давлением требуют подогрева до 600÷800 °С. На прочность этих сплавов, помимо алюминия, благоприятно влияют цирконий и кремний. Псевдо- α -сплавы с содержанием алюминия 7÷8 %, легированные дополнительно Zr, Si, Mo, Nb, V (BT20), используют в изделиях, работающих при наиболее высоких (среди титановых сплавов) температурах, где требуется жаропрочность.

Двухфазные (α + β)-сплавы обладают лучшим сочетанием технологических и механических свойств. Эти сплавы легированы в основном алюминием и β -стабилизаторами. Необходимость легирования алюминием обусловлена тем, что он значительно упрочняет α -фазу, тогда как β -стабилизаторы мало растворимы в этой фазе и потому не оказывают существенного влияния на ее свойства. Такие β -стабилизаторы, как Mo, V, Nb на свойства сплава влияют по-разному. Сильное упрочняющее воздействие оказывает Mo, особенно при содержании его в сплаве более 4 %. Слабее упрочняют V и Nb, при этом они мало снижают пластичность сплавов. Однако наибольшее упрочнение достигается при легировании титана эвтектоидообразующими β -стабилизаторами: Fe, Cr, Mn. Поэтому двухфазные промышленные сплавы содержат и те и другие β -стабилизаторы. Сплавы упрочняются с помощью термиче-

ской обработки — закалки и старения. В отожженном и закаленном состояниях они имеют хорошую пластичность, а после старения — высокую прочность. При этом чем больше β -фазы содержится в структуре сплава, тем он прочнее в отожженном состоянии и сильнее упрочняется при термической обработке.

Весьма распространенными являются сплавы ВТ6, ВТ9, ВТ16. Наличие большого количества β -фазы (например, структура сплава ВТ22 состоит на 50 % из β -фазы) обеспечивает сплавам наиболее высокую прочность среди $(\alpha+\beta)$ -сплавов как в отожженном, так и в закаленном состояниях.

Двухфазные сплавы удовлетворительно обрабатываются резанием и свариваются. Они меньше склонны к водородной хрупкости, чем α - и псевдо- α -сплавы, поскольку водород обладает большей растворимостью в β -фазе. Эти сплавы куются, штампуются и прокатываются существенно легче, чем сплавы с α -структурой. Они поставляются в виде поковок, штампованных заготовок, прутков, листов, ленты.

Псевдо- β -сплавы (ВТ15) — это сплавы высоколегированные, в основном β -стабилизаторами. Суммарное количество легирующих элементов, как правило, превышает 20 %. Наиболее часто для легирования используют Mo, V, Cr, реже Fe, Zr, Sn. Алюминий присутствует почти во всех сплавах, но в небольших количествах ($\sim 3\%$). В равновесном состоянии сплавы имеют преимущественно β -структуру с небольшим количеством α -фазы.

Эти сплавы обладают хорошей пластичностью ($\delta = 12\div 40\%$; $\Psi = 30\div 60\%$), легко обрабатываются давлением, имеют сравнительно невысокую прочность ($\sigma_B = 650\div 1000$ МПа). В зависимости от химического состава временное сопротивление после старения составляет $1300\div 1800$ МПа.

Чисто однофазные β -сплавы не имеют промышленного применения, так как для получения устойчивой β -структуры сплавы должны быть легированы большим количеством дорогих β -стабилизаторов (V, Mo, Nb, Ta).

Титан образует с углеродом стойкий карбид TiC, который плавится при 3140°C . Растворимость углерода в β -фазе невелика, она составляет всего 0,8 % при 1750°C и 0,15 % при 920°C . Углерод меньше влияет на свойства титана, чем кислород и азот. В области малых концентраций (до 0,3 %) одна сотая доля процента углерода повышает временное сопротивление разрыву и предел текучести титана при-

мерно на 7 МПа, т. е. в три раза менее интенсивно, чем азот. Меньшее упрочняющее действие углерода по сравнению с азотом и кислородом объясняют меньшими силами связи атомов углерода с дислокациями по сравнению с системами Ti-O и Ti-N. Если концентрация углерода превышает предел растворимости, то углерод значительно снижает пластичность титана из-за выделения карбида.

Большим недостатком титана и его сплавов является склонность к водородной хрупкости. Она заключается в резком снижении механических свойств при содержаниях водорода, больших критического значения. О склонности титана и его сплавов к водородной хрупкости обычно судят по результатам испытаний на ударную вязкость и замедленное разрушение.

Снижение ударной вязкости титана и его α -сплавов обусловлено выделением гидридов, которые располагаются преимущественно вдоль плоскостей скольжения и двойникования. Пластинчатая форма выделений гидридной фазы и их ориентация внутри зерен служат причиной значительного снижения ударной вязкости титана в присутствии водорода. Разрушение распространяется по поверхности раздела между гидридной фазой и матрицей. Образование и распространение трещин вдоль гидридов облегчается внутренними растягивающими напряжениями, которые возникают из-за большего удельного объема гидридов по сравнению с основным металлом, а также из-за слабого сцепления между гидридом и матрицей.

Алюминий затрудняет образование гидридной фазы, поэтому увеличение его содержания в титановых α -сплавах — эффективный способ уменьшения их склонности к водородной хрупкости.

Растворимость водорода в β -фазе значительно больше, чем в α -фазе, поэтому титановые сплавы с β - или с $(\alpha + \beta)$ -структурой мало склонны к водородной хрупкости. Например, ударная вязкость сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ6 начинает снижаться лишь при концентрациях водорода более 0,12 %.

Водородная хрупкость, которая выявляется при испытаниях на ударную вязкость в $(\alpha + \beta)$ и β -сплавах, может быть также вызвана не гидридами, а растворенным водородом. Эта хрупкость аналогична хладноломкости, обусловленной такими примесями внедрения, как кислород, азот, и связана с тем, что атомы водорода блокируют источники дислокаций во вторичных плоскостях скольжения и уменьшают скорость движения генерированных ими дислокации. Хрупкость

этого вида развивается при больших содержаниях водорода в β -фазе: 0,3 мас. % и более:

Поскольку водородная хрупкость проявляется, если содержание водорода оказывается выше определенного предела, поэтому его концентрация в титане и сплавах не должна превышать максимально допустимых значений. Установлены следующие предельно возможные концентрации водорода в титане и его сплавах, % (по массе):

| | | | |
|--------|-------|-------|------|
| BT1-00 | BT1-0 | OT4-1 | OT4 |
| 0,008 | 0,01 | 0,005 | 0,01 |

В остальных сплавах допускается не более 0,015 % водорода.

Металлургическая промышленность выпускает полуфабрикаты с содержанием водорода меньше максимально допустимых значений (один из путей — вакуумный отжиг). Однако при последующих технологических операциях, особенно связанных с травлением полуфабрикатов, содержание водорода в титане и его сплавах может существенно возрастать. Помимо этого, возможно наводороживание титановых изделий в процессе их эксплуатации. Поэтому защита титана и его сплавов от газонасыщения является общей проблемой как при термической обработке, так и при горячей обработке давлением. Для этого были созданы различные защитные покрытия. Разработанные в основном для предотвращения окисления и газовой коррозии, эти покрытия защищают титан и от наводороживания, поскольку исключают взаимодействие металла с парами воды — основным источником наводороживания при нагреве. При нанесении подходящего покрытия интенсивность окисления может быть снижена в несколько десятков раз.

Однако нельзя не упомянуть об очень интересном явлении — водородном пластифицировании титана. Известно, что водород обратимо взаимодействует с металлами. Его можно сравнительно легко ввести в металл путем нагрева в водородной атмосфере и также легко вывести в результате вакуумного отжига. Применительно к титановым сплавам обнаружены следующие обусловленные водородом эффекты, которые можно использовать на практике:

- а) в определенном интервале повышенных температур водород приводит к значительному (в несколько раз) снижению напряжений течения металла (предела текучести);

- б) водород в определенном интервале концентраций увеличивает предельную степень деформации до появления первой трещины;
- в) легирование титановых сплавов водородом позволяет целенаправленно управлять структурообразованием при термической обработке, в частности сравнительно легко преобразовывать грубую пластинчатую структуру в мелкозернистую глобулярную;
- г) при механической обработке титановых сплавов водород снижает температуру в зоне резания и усилие резания;
- д) водород облегчает процессы адгезии (диффузионного схватывания, т. е. сцепления).

Эффекты, связанные со снижением напряжений течения металла и повышением предельных степеней деформации в результате легирования титановых сплавов водородом, получили название *водородного пластифицирования*. Следует различать высокотемпературное и низкотемпературное водородное пластифицирование. Высокотемпературное пластифицирование наблюдается при температурах $500 \div 1100$ °C (в зависимости от класса сплава) и проявляется как в снижении напряжений течения металла, так и в повышении предельных степеней деформации. Низкотемпературное водородное пластифицирование наблюдается при температурах, близких к комнатной, и проявляется в повышении предельных степеней деформации до появления первой трещины; при этом напряжение течения металла может и возрасти.

Высокотемпературное водородное пластифицирование в наибольшей степени проявляется в псевдо- α -сплавах титана с высоким содержанием алюминия, в меньшей степени — в $(\alpha + \beta)$ -сплавах и почти не наблюдается в β -сплавах.

Однозначного объяснения механизма водородного пластифицирования в настоящее время не существует, поэтому приведем основные мнения на этот счет без оценки их достоверности.

Одним из механизмов благоприятного влияния водорода на пластичность титановых сплавов может быть стабилизация растворенным водородом более пластичной β -фазы.

С другой стороны, наводороживание существенно изменяет параметры решеток фаз (как правило, увеличивает их). Увеличение межплоскостного расстояния сопровождается снижением уровня напряжений, необходимых для движения дислокаций, и может служить одной из причин уменьшения предела текучести.

Кроме того, эффект водородного пластифицирования можно, по-видимому, объяснить увеличением диффузионной подвижности атомов металлической матрицы при легировании сплавов водородом, вследствие чего возрастает вклад диффузионной ползучести в общую деформацию. Увеличение коэффициентов диффузии атомов матрицы при легировании водородом было экспериментально обнаружено в железе, никеле и сплавах на их основе.

На практике водородное пластифицирование целесообразно использовать в производстве полуфабрикатов из труднодеформируемых высокожаропрочных титановых сплавов. Наиболее эффективное водородное пластифицирование при горячей деформации достигается при следующих концентрациях водорода: для сплавов ВТ18У, ВТ3-1, ВТ9 — $0,2 \div 0,3$ %; для сплава ВТ5-1 — $0,3 \div 0,4$ %, для сплавов СТ4 и СТ5 — $0,45$ %. При таких концентрациях водорода можно снизить температуру изотермической деформации на $100 \div 150$ °С. Это позволяет снизить износ штампов.

Возможности управления образованием структуры титановых сплавов путем обратимого легирования водородом составили основу термоводородной обработки, которая состоит в наводороживании титановых сплавов до определенных концентраций, термической обработке и вакуумном отжиге. Термоводородная обработка позволяет: перевести термически неупрочняемые псевдо α -сплавы в класс термически упрочняемых ($\alpha + \beta$)-сплавов; преобразовать грубые пластинчатые структуры в мелкозернистые глобулярные (что приводит к увеличению прочности и пластичности).

Легирование титана и его сплавов водородом способствует понижению температуры в зоне резания и уменьшению усилий резания и, как следствие, повышению стойкости инструмента. При обработке титановых сплавов, легированных водородом, стойкость инструмента в $5 \div 10$ раз выше, чем при обработке сплавов без водорода.

Легирование титановых сплавов водородом приводит к усилению адгезии. Этот эффект проявляется в следующем эксперименте. Если несколько образцов для испытаний на ударную вязкость отжечь в вакууме, то они довольно легко отделяются друг от друга. Если же образцы отжигать в водородсодержащей атмосфере при такой же температуре и выдержке, то после отжига их не удастся отделить друг от друга без повреждения поверхности.

Эффект усиления адгезии, обусловленный водородом, так же, как и водородное пластифицирование и термоводородная обработка, может быть использован при совершенствовании технологии диффузионной сварки, компактировании порошковых материалов и гранул. Вследствие этого оказалось возможным получить качественные диффузионные соединения и компактированные материалы при температурах на $100 \div 150$ °С более низких, чем при использовании обычных технологий.

4.4.3. Термообработка титановых сплавов

Титановые сплавы в основном подвергают отжигу, закалке и старению, а также химико-термической обработке.

Отжиг проводят главным образом после холодной деформации для уменьшения сопротивления деформации и повышения пластичности сплава. Температура отжига должна быть выше температуры рекристаллизации, но не может превышать границу перехода в β -состояние во избежание роста зерна. Температура рекристаллизации титана, в зависимости от его чистоты и степени предшествующей деформации, лежит в интервале $400 \div 600$ °С. Практически же отжиг титановых сплавов проводят при $670 \div 800$ °С с выдержкой от 15 мин до 3 ч. Тонколистовой прокат рекомендуется отжигать в вакууме для предотвращения насыщения газами и охрупчивания. При отжиге $(\alpha + \beta)$ -сплавов осуществляется также стабилизация β -фазы и предотвращается эвтектоидный распад и последующее охрупчивание сплава.

Упрочняющая термическая обработка (закалка и старение) применима только к сплавам с $(\alpha + \beta)$ -структурой. Закалка состоит в нагреве до β -состояния и охлаждения в воде. В некоторых случаях, чтобы избежать интенсивного роста зерна, который происходит в β -состоянии, закалку производят из $(\alpha + \beta)$ -области. Результатом закалки является мартенситное превращение $\beta \rightarrow \alpha'$. В высоколегированных титановых сплавах температура начала мартенситного превращения может быть ниже комнатной, поэтому при закалке фиксируется переохлажденная β -фаза (иногда ее обозначают β').

При нагреве закаленных титановых сплавов происходит распад метастабильной фазы (мартенсита). Если при нагреве закаленного сплава происходит распад метастабильной α' -фазы (мартенсита), то гово-

рят об отпуске сплава. Если же распадается метастабильная β' -фаза, то говорят о старении.

Для повышения износостойкости титановые сплавы подвергают поверхностному насыщению азотом — азотированию. Лучшие результаты дает азотирование в среде сухого, очищенного от кислорода азота. Оно повышает поверхностную твердость, износостойкость, жаропрочность и *жаростойкость* (способность сопротивляться образованию окалины), тогда как азотирование в аммиаке способствует охрупчиванию титановых сплавов вследствие насыщения водородом. Обычно азотируют при $850 \div 950$ °С в течение $10 \div 50$ ч. При этом на поверхности образуются тонкий нитридный слой и обогащенный азотом α -твердый раствор. Толщина нитридного слоя равна $0,06 \div 0,2$ мм, *HV* 12000. Глубина слоя, обогащенного азотом α -твердого раствора, равна $0,1 - 0,15$ мм, *HV* $5000 \div 8000$. Для устранения хрупкого нитридного слоя и уменьшения хрупкости азотированного слоя рекомендуется проводить вакуумный отжиг (при $800 \div 900$ °С).

Для повышения жаростойкости титановые сплавы подвергают силицированию и другим видам диффузионной металлизации.

Термомеханическая обработка в некоторых случаях обеспечивает более высокий комплекс механических свойств по сравнению с собственно термической обработкой.

Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) титановых сплавов заключается в горячей деформации сплава в $\alpha + \beta$ - или β -области, закалке с деформационного нагрева и старении. В результате закалки, осуществляемой сразу после окончания горячей деформации, в металле подавляются рекристаллизационные процессы и сохраняются, хотя бы частично, особенности структуры и тонкого строения горячедеформированного металла. Старение сплава с такой структурой обеспечивает повышенные механические свойства по сравнению с упрочняющей термической обработкой, включающей стандартную закалку и старение.

Эффективность использования ВТМО для улучшения комплекса свойств титановых сплавов связана с их способностью не только к деформационному наклепу, но и к термическому упрочнению, обусловленному распадом метастабильных фаз, фиксируемых ускоренным охлаждением после завершения горячей деформации. Поэтому существенный эффект ВТМО наблюдается только у титановых сплавов с достаточным количеством нестабильной β -фазы.

При ВТМО возрастают (по сравнению со стандартной обработкой) не только прочностные, но и пластические свойства сплавов, вязкость разрушения, сопротивление усталости и длительная прочность при повышенных температурах.

Оптимальным режимом ВТМО $\alpha+\beta$ -титановых сплавов является деформация на 40÷70 % в верхнем интервале температур $\alpha+\beta$ -области (850÷920 °С) с последующей закалкой с деформационного нагрева и старением. Предпочтительные режимы старения при ВТМО для сплавов ВТ8 и ВТ14 близки к режимам, рекомендуемым для стандартных режимов термического упрочнения.

После деформации в $\alpha+\beta$ -области перерыв между деформацией и закалкой до 10 с не вызывает существенных изменений в свойствах после старения для сплавов ВТ3-1 и ВТ8. После деформации в β -области допустим перерыв до 30 с. При ВТМО сплава ВТ14 с деформацией в $\alpha+\beta$ -области необходима закалка сразу же после деформации, так как даже перерыв в несколько секунд заметно снижает эффект упрочнения.

Высокотемпературную термомеханическую обработку β -сплавов можно проводить с охлаждением после деформации на воздухе, а не в воде, так как критическая скорость охлаждения, необходимая для фиксации метастабильной β -фазы, для β -сплавов невелика. Методами ВТМО в сплаве ВТ15 можно получить временное сопротивление разрыву $\sigma_B = 1700$ МПа при поперечном сужении 5÷8 % вместо $\sigma_B = 1500$ МПа и сужения 10 % после стандартной термической обработки.

Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО) титановых сплавов состоит в закалке, последующей пластической деформации (холодной или теплой) в условиях достаточной стабильности β -твердого раствора при температурах ниже температуры рекристаллизации (T_p) и старения на заключительной стадии. Теплая или холодная деформация закаленных титановых сплавов приводит к резкому ускорению распада метастабильных фаз, зафиксированных закалкой (чаще всего метастабильной β -фазы). Старение при НТМО по стандартным режимам, принятым при обычной термической обработке, приводит к сильному упрочнению при сохранении достаточной пластичности.

Оптимальные степени холодной деформации при НТМО β -сплавов и малолегированных $\alpha+\beta$ -титановых сплавов составляют 40÷50 %. Получаемое при этом упрочнение возрастает с увеличением содержа-

ния β -фазы в сплаве. Для малопластичных при низких температурах α + β -сплавов типа ВТЗ-1, ВТ9 оптимальная степень холодной и теплой деформации ниже. НТМО позволяет получить более высокий уровень прочности по сравнению с ВТМО при меньшей пластичности.

Упрочнение, достигаемое при НТМО, снижается при нагреве до сравнительно невысоких температур, поэтому ее применение наиболее целесообразно для термически упрочняемых нежаропрочных сплавов. Для жаропрочных сплавов более пригодна ВТМО, обеспечивающая более высокую термическую стабильность титановых сплавов.

4.4.4. Области применения титана и его сплавов

Важнейшей областью использования титановых сплавов является авиа- и ракетостроение. Из титановых сплавов для самолетов и ракет изготавливают корпуса двигателей, баллоны для газов, сопла, диски, лопасти турбин, детали крепежа, фюзеляжа. Следует отметить, что у аппаратов, летящих со сверхзвуковой скоростью, их обшивка сильно нагревается (при скорости, равной, например, тройной скорости звука, температура достигает $250 \div 320$ °С). Для таких условий наиболее приемлемы титановые сплавы, обладающие высокой жаропрочностью, а также малым удельным весом и повышенной прочностью при комнатной температуре.

В химической промышленности применяются материалы с повышенной коррозионной стойкостью. Титановые сплавы могут оказаться наиболее пригодными именно с этой точки зрения. Из них изготавливают емкости, насосы, клапаны, вентили и т. д. В морском и речном судостроении, помимо коррозионной стойкости, важным свойством материалов является также их низкий удельный вес. Поэтому гребные винты, обшивки морских судов, подводных лодок и т. д. создают из титановых сплавов.

Широко применяется титан и его сплавы в производстве оборудования для ядерных реакторов или работающего в условиях повышенной радиации.

Высокая ударная вязкость титановых сплавов ($1 \div 1,6$ МДж/м²) сохраняется до температуры жидкого водорода (-253 °С). Поэтому они используются в криогенной технике в качестве конструкционных материалов.

4.4.5. Пример решения задачи по выбору изделий из титановых сплавов

В связи со значительным нагревом обшивки сверхзвуковых самолетов обычно применяемые алюминиевые сплавы оказываются непригодными. Рекомендовать сплав с повышенными механическими свойствами и удельной прочностью при температурах до $400\div 450$ °С. Привести состав сплава, технологию его обработки, структуру и свойства при нормальных и повышенных температурах.

Решение. Применение титановых сплавов в авиационной технике наиболее целесообразно в интервале температур 250—500 °С, когда легкие алюминиевые сплавы вследствие снижения прочности уже не могут работать, а стали и никелевые сплавы уступают им по удельной прочности.

Исходя из общего принципа выбора титановых сплавов, состоящего в том, что для тех деталей или конструкций, где коррозионная стойкость имеет важное значение, предпочтительно использование однофазных α -титановых сплавов, а для деталей, где решающую роль играет высокая прочность, — двухфазных сплавов. С учетом изложенного подхода для решения данной задачи следует сосредоточиться на выборе однофазных α -титановых сплавов.

К α -сплавам ВТ1-0, ВТ1-00, ВТ5-1, ПТ7 М принадлежат сплавы, легированные, помимо алюминия, нейтральными упрочнителями: оловом и цирконием. Последние улучшают технологические свойства сплавов титана с алюминием, замедляют их окисление и повышают сопротивление ползучести. Из сплавов этой группы для решения данной задачи целесообразно выбрать промышленный сплав ВТ5-1, содержащий около 5 % Al и 2,5 % Sn (см. табл. 4.17). Этот сплав обладает значительной прочностью, мало чувствителен к надрезу, имеет удовлетворительный предел выносливости, сохраняет значительную жаропрочность до температур, не превышающих 450 °С; хорошо сваривается без охрупчивания шва и околошовной зоны. Сплав термически стабилен, термической обработкой не упрочняется. Из титановых сплавов его считают также наилучшим для применения при криогенных температурах.

Таким образом, промышленный титановый сплав ВТ5-1 удовлетворяет изложенным в условиях задачи требованиям, предъявляемым к обшивке сверхзвуковых самолетов.

4.5. Никелевые сплавы

Никель относится к группе тяжелых цветных металлов. Это серебристо-белый металл. Его атомный вес 58,69, плотность 8800 кг/м^3 , температура плавления 1455°C . Никель, как и платина, и палладий, является химически стойким элементом, он не окисляется в атмосферных условиях при комнатной температуре. При нагревании до $700\div 800^\circ\text{C}$ под действием воды и ее паров, а также кислорода воздуха несколько тускнеет.

При комнатной температуре никель ферромагнитен. Одним из его важных магнитных свойств является магнитострикция, то есть относительное изменение длины ферромагнитного тела при намагничивании. Никель укорачивается под действием магнитного поля. При 358°C никель теряет свои магнитные свойства.

В чистом виде никель пластичен и имеет достаточную прочность. Он может подвергаться всем видам механической обработки. Никель, так же как и железо, хорошо сваривается.

Механические характеристики никеля в различных состояниях приведены в табл. 4.18.

Таблица 4.18

Механические характеристики никеля

| Состояние металла | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | НВ, МПа |
|---------------------|------------------|----------------------|--------------|-----------------|
| Отожженный металл | $280\div 300$ | — | $40\div 50$ | — |
| Холоднокатаный лист | $630\div 770$ | $590\div 740$ | $1\div 2$ | $1300\div 1600$ |
| Отожженный лист | $420\div 30$ | $100\div 180$ | $35\div 45$ | $900\div 1000$ |

Никель имеет ГЦК-решетку. Вопрос о его полиморфизме остается дискуссионным. Однако в процессе нагревания никель при 360°C испытывает магнитное превращение, связанное с переходом из ферромагнитного в парамагнитное состояние.

Большое влияние на механические свойства никеля оказывают примеси. Особенно вредными примесями, ухудшающими механические свойства никеля, являются сера, свинец, цинк и углерод.

Никель выпускается пяти марок со следующим содержанием никеля, %: Н0 — 99,99, Н1 — 99,93, Н2 — 99,8, Н3 — 98,6, Н4 — 97,6.

Сплавов на основе никеля насчитывается более трех тысяч наименований. Их можно разделить на следующие группы: а) жаропрочные, б) конструкционные, в) электротехнические, г) с особыми физическими свойствами.

Никелевые сплавы маркируют условными обозначениями, не имеющими отношения к их химическому составу (например, ЭИ437Б, ЭП742), или применяют систему обозначений, сходную с принятой для сталей. В последнем случае марка сплава состоит из букв, обозначающих элементы, входящие в его состав: Н — никель; Х — хром; Т — титан; Ю — алюминий; Р — бор; В — вольфрам; М — молибден; Б — ниобий; К — кобальт. Обозначение сплава начинается с буквы Х, затем идет Н и цифра, отражающая среднее содержание никеля, а далее — буквы, обозначающие остальные легирующие элементы в порядке уменьшения их содержания. Так, например, сплав ХН70МВТЮБ (другое его обозначение ЭИ598) содержит, %: 70 — Ni, 5 — Mo, 3 — W, 2,4 % Ti, 1,3 — Al, 0,9 — Nb, остальное Cr (17 %). В некоторых марках сплавов после буквы Х указывают содержание хрома (например, Х10Н90).

4.5.1. Жаропрочные сплавы

Жаропрочные сплавы обладают повышенными пределом ползучести и длительной прочности. Основой этих сплавов является система Ni-Cr-Fe. В качестве легирующих присадок для придания сплавам необходимых жаропрочных свойств вводят Ti, Al, Mo, W, Nb, С, В, Ва, Са, Zr, Се.

В зависимости от назначения все жаропрочные сплавы делят на деформируемые и литейные.

Основой *деформируемых жаропрочных сплавов* является сложнолегированный (С, Fe, Al, Nb, Mo, W, Ti) твердый раствор на основе никеля, характеризующийся высокой прочностью и термической стабильностью. Повышенная прочность и жаропрочность сплавов обеспечиваются образованием высокодисперсных частиц упрочняющих фаз Ni₃(Al, Ti), TiAl₃, TiC, Cr₇C₃, Cr₅B₃, (Mo, Cr, W, Ni)₄B₃ и др.

Вредные легкоплавкие и хрупкие примеси (Bi, Pb, Sb, Sn) резко снижают жаропрочность сплавов. Повышение жаропрочных свойств достигается увеличением содержания алюминия и титана как элементов, вызывающих дисперсное твердение сплавов, а также введением при-

садок тугоплавких металлов (W, Mo, Nb), способствующих торможению диффузионных процессов, и, наконец, добавками В, Са, Zr и Се, оказывающими существенное влияние на упрочнение границ зерен и подавление вредного воздействия легкоплавких примесей.

Наибольшее применение в промышленности получили деформируемые жаропрочные никелевые сплавы марок ЭИ437А, ЭИ437Б, ЭИ617, ЭИ598 и др. Их составы и механические свойства приведены в табл. 4.19 и 4.20.

Таблица 4.19

Химический состав жаропрочных деформируемых сплавов (мас. %, остальное Ni)

| Марка сплава | Заводская марка | Cr | Ti | Al | Fe | Mn | Mo | W | C | Si |
|--------------|-----------------|----|-----|-----|----|-----|----|-----|------|-----|
| ХН77ТЮ | ЭИ-437А | 20 | 2,5 | 0,7 | 4 | 0,4 | — | — | 0,6 | 0,6 |
| ХН77ТЮР * | ЭИ-437Б | 20 | 2,5 | 0,7 | 4 | 0,4 | — | — | 0,6 | 0,6 |
| ХН70ВМТЮ** | ЭИ617 | 15 | 2 | 2 | 5 | 0,5 | 3 | 6 | 0,12 | 0,6 |
| ХН70ВМТЮБ*** | ЭИ598 | 17 | 2,4 | 1,5 | 5 | 0,5 | 4 | 2,8 | 0,12 | 0,6 |

* Дополнительно 0,8 % Nb; ** дополнительно 0,35 % V; *** дополнительно 0,01 % В и 0,01 % Ва.

Таблица 4.20

Механические свойства жаропрочных деформируемых сплавов

| Марка сплава | Заводская марка | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % | КСУ, МДж/м ² | НВ, МПа |
|--------------|-----------------|------------------|----------------------|--------------|------------|-------------------------|---------|
| ХН77ТЮ | ЭИ-437А | 1000 | 600 | 25 | 28 | 0,8 | 2850 |
| ХН77ТЮР | ЭИ-437Б | 1000 | 650 | 20 | 21 | 0,5 | 2850 |
| ХН70ВМТЮ | ЭИ617 | 1140 | 750 | 14 | 15 | 0,15÷0,30 | 3100 |
| ХН70ВМТЮБ | ЭИ598 | 1050 | 700 | 16 | 16 | — | 3000 |

Деформируемые жаропрочные сплавы подвергают термической обработке двух видов. Первый и наиболее простой вид термической обработки — отжиг, который проводят между последовательными стадиями механической обработки сплавов с целью смягчения материала для дальнейших операций или перед сдачей изделия в эксплуатацию. Термическую обработку второго типа применяют для создания особых механических свойств, которыми должно обладать изготавливаемое изделие. Такая термическая обработка жаропрочных сплавов на никелевой основе состоит из закалки с высоких температур и последующего старения при более низких температурах, в ре-

зультате чего образуется твердый раствор, упрочненный дисперсными частицами (например, γ' -фазы $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$). Такая структура обеспечивает сопротивление пластической деформации при комнатной и повышенной температурах испытания. Образование дисперсных частиц γ' -фазы приводит к заметному снижению пластических свойств, ударной вязкости и длительной пластичности. Материалы с низкой пластичностью не могут быть использованы с достаточной надежностью для деталей с длительным ресурсом работы, так как возникает опасность внезапного разрушения их из-за исчерпания высокотемпературной пластичности.

С целью улучшения этой характеристики разработаны и применены ступенчатые режимы термической обработки. Термическая обработка этого сплава состоит из закалки на воздухе с $1100 \div 1200^\circ\text{C}$ и последующего трехступенчатого технологического старения. После обработки по режиму с трехступенчатым старением по границам зерен появляются скоагулированные частицы γ' -фазы и карбидов — преимущественно M_6C . В результате при незначительном снижении прочностных свойств пластические свойства увеличиваются вдвое.

Литейные жаропрочные никелевые сплавы отличаются от деформируемых следующими преимуществами:

- 1) более высокими жаропрочными свойствами при высоких температурах в связи с возможностью введения в сплавы легирующих элементов в больших концентрациях;
- 2) более высоким коэффициентом использования (доля металла в изделии от его количества в полуфабрикate), а именно $0,8 \div 0,95$ вместо $0,15 \div 0,25$ для деформируемых сплавов;
- 3) меньшей трудоемкостью изготовления деталей;
- 4) возможностью получения пустотелых изделий.

Основной недостаток этих сплавов — пониженная пластичность, особенно в интервале рабочих температур.

По химическому составу литейные жаропрочные сплавы близки к жаропрочным деформируемым.

Структура литейных сплавов представлена γ -раствором на основе Ni , γ' -фазой $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, количество которой может достигать до $50 \div 60\%$, карбидами (TiC), карбонитридами ($\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$) и боридами (Cr_3B_2 , $(\text{Mo}, \text{W}, \text{Cr})_3\text{B}_2$). Из-за ликвации легирующие элементы неоднородно распределяются по объему зерна. При высокотемпературном нагреве под закалку последствия дендритной ликвации частично

устраняются, что способствует более равномерному распределению γ' -фазы, выделяющейся при последующем старении.

Состав и механические литейных жаропрочных никелевых сплавов приведены в табл. 4.21 и 4.22.

Таблица 4.21

Химический состав жаропрочных литейных сплавов (мас. %, остальное Ni)

| Марка сплава | Химический состав, мас. %, остальное Ni | | | | | | | | |
|--------------|---|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|------|
| | Cr | Ti | Al | Fe | Mn | Mo | W | C | Si |
| Хастеллой В | — | — | — | 5,5 | 1 | 28 | — | — | 1 |
| Хастеллой С | 15 | — | — | 5,5 | 1 | 17 | 4,5 | 0,15 | 1 |
| ВЛ7-45У | 20 | — | — | 24,5 | 0,7 | — | 8 | 0,10 | 0,55 |
| ЖС3 | 16 | 2 | 1,9 | 8 | — | 3,8 | 5,5 | 0,15 | — |
| ВЖ36-Л2 | 20,5 | 2,5 | 3,8 | 1,5 | — | — | — | 0,06 | — |
| ЖС6 | 12,5 | 2,5 | 5 | 2 | — | 4,8 | 7 | 0,16 | — |
| ЖС6 К* | 11,5 | 2,5 | 5,5 | — | — | 3,5 | 5 | 0,15 | — |

* 4,5 % Co

Таблица 4.22

Механические свойства жаропрочных литейных сплавов

| Марка сплава | σ_B , МПа | δ , % | Ψ , % |
|--------------|------------------|--------------|------------|
| Хастеллой В | 530 | 6 | 10 |
| Хастеллой С | 400 | 12 | 14 |
| ВЛ7-45У | 500 | 7 | 10 |
| ЖС3 | 750 | 8,5 | 14 |
| ВЖ36-Л2 | 860 | 3 | 5 |
| ЖС6 | 1040 | 1 | 2 |

В этих таблицах первые пять сплавов отличаются тем, что основными упрочняющими фазами в их структуре являются простые и сложные карбиды типа $Me_{23}C_6$, Me_7C_3 и т. д. (сплавы с карбидным упрочнением).

В сплавах, подобных ЖС6, упрочнение достигается за счет дисперсных частиц различных интерметаллидных соединений типа $Ni_3(Al, Ti)$, а также за счет легирования твердого раствора Cr, W, Mo, Co, Fe.

Как в деформируемых жаропрочных сплавах, существенное влияние на свойства жаропрочных литейных никелевых сплавов оказывают легкоплавкие и хрупкие примеси: S, Sb, Bi, Pb и др. Применение электродуговой вакуумной плавки и введение специальных добавок (Ce, La и др.) позволяют нейтрализовать их вредное влияние.

4.5.2. Конструкционные сплавы

Технический никель, содержащий небольшие добавки марганца, кремния, углерода и магния, которые обычно вводят как раскислители и десульфураторы (то есть выводят кислород и серу из раствора, связывая их в химические соединения — оксиды и сульфиды), наряду с высокой коррозионной стойкостью обладает повышенными механическими свойствами.

Из числа никелевых сплавов ярким представителем конструкционных материалов является так называемый монель-металл. Он хорошо обрабатывается в горячем и холодном состояниях, сопротивляется действию агрессивных газов при высоких температурах и сохраняет прочность при нагреве до температуры 400 °С. Сплав хорошо противостоит действию атмосферы, водных растворов солей и щелочей, пара и органических кислот.

По своей структуре монель-металл относится к сплавам типа твердых растворов системы Ni-Cu. Небольшие присадки железа и кремния, так же как медь, находятся в растворе и самостоятельных фаз не образуют. Микроструктура сплава подобна чистому никелю.

Механические свойства монель-металлов и никеля указаны в табл. 4.23.

Таблица 4.23

Механические свойства монель-металлов и никеля

| Марка | Fe* | Mn* | Cu* | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | Ψ , % | НВ, МПа |
|---------------------|-----|-----|-----|------------------|----------------------|--------------|------------|---------|
| НМц2,5 | — | 3,0 | — | 500 | 190 | 40 | 60 | — |
| НМц5 | — | 5,1 | — | 630 | 230 | 43 | 60 | 1400 |
| НМЖМц 28-2,5-1,5 | 2,5 | 1,5 | 28 | 500 | 240 | 35 | 70 | 1300 |
| Никель | — | — | — | 430 | 120 | 37 | 70 | 800 |

* Процент по массе, остальное Ni

4.5.3. Электротехнические сплавы на никелевой основе

Наиболее распространены сплавы: хромель марок НХ9 и НХ9,5, алюмель НМцАК2-2-1, копель МНМц48-0,5, а также частично константан МНМц40-1,5 и нихром Х20Н80.

Сплавы НХ9,5 (хромель 1) и НХ9 (хромель 2) являются двойными сплавами никеля с хромом с небольшими добавками марганца.

Сплав НМцАК2-2-1 (алюмель) также относится к сплавам типа твердых растворов марганца, алюминия и кремния в никеле.

Сплав МНМц40-1,5 (константан) является типичным тройным твердым раствором никеля и марганца в меди. Этот сплав в паре с медью, серебром и железом дает большую термоЭДС при очень малом температурном коэффициенте электросопротивления. Константан достаточно коррозионно-стойк.

Сплав МНМц43-03 (копель) является аналогом константана, но содержит несколько больше никеля. Этот сплав отличается высоким удельным электросопротивлением, в паре с медью, хромелем и железом дает большую термоЭДС при очень малом температурном коэффициенте электросопротивления. Применяется в качестве компенсационного провода, отрицательного электрода термопар и в радиотехнических приборах для рабочих температур, не превышающих 600 °С.

Сплав Х20Н80 (нихром) является типичным сплавом сопротивления. Его удельное электрическое сопротивление приблизительно в 70 раз больше, чем у меди ($1,15 \text{ Ом} \times \text{мм}^2/\text{м}$ для нихрома против $0,0172 \text{ Ом} \times \text{мм}^2/\text{м}$ для меди). Рабочую температуру нихромов можно повысить до $1150 \div 1200 \text{ °С}$ введением в сплав до 0,1 % церия.

Тройные сплавы на железной основе, содержащие $4 \div 7 \%$ Al, $20 \div 35 \%$ Сг и небольшое количество углерода — до 0,1 % (остальное Ni), известны под названием канталы и магпир. Они имеют более высокое электрическое сопротивление, чем нихром, и характеризуются большой жаростойкостью (сопротивляются окислению при высоких температурах), вызванной плотной пленкой окиси, богатой Al_2O_3 . Рабочая температура этих сплавов может достигать до 1300 °С.

4.5.4. Сплавы с особыми физическими и химическими свойствами

В приборостроении и машиностроении требуются сплавы с самыми разнообразными свойствами, в том числе с особыми физическими константами.

Так, например, для изготовления деталей некоторых приборов и аппаратуры (эталонные длины, маятники хронометров и т. д.) требуются материалы, которые не должны менять своих размеров с изменением

температуры или эти изменения должны укладываться в определенные пределы.

Для создания постоянных магнитов требуются материалы, имеющие большое остаточное намагничивание (остаточная индукция) и большую коэрцитивную силу.

Для магнитопроводов (сердечники и якоря электромагнитов, сердечники трансформаторов и т. д.), наоборот, требуются материалы с большой магнитной проницаемостью и минимальной остаточной индукцией.

Для ряда приборов требуются материалы, не обладающие способностью намагничиваться. Наиболее ценными материалами в этом отношении являются сплавы, созданные на основе системы Ni-Fe.

При высоких температурах (выше $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) никель с железом образует непрерывный ряд твердых растворов с кубической гранецентрированной решеткой (γ -раствор). У сплавов железо-никель коэффициент линейного расширения и магнитная проницаемость при прибавлении никеля изменяются по сложным зависимостям. Если у чистого железа коэффициент линейного расширения при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен $12,7 \times 10^{-6}$, то для сплава с $35 \div 37\%$ Ni этот коэффициент составляет уже $1,8 \times 10^{-6}$, т. е. уменьшается примерно в 7 раз. Сплав, содержащий $35 \div 37\%$ Ni, около $0,3\%$ C, остальное — железо, называется инвар. Этот сплав практически не расширяется при повышении температуры до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Он применяется для деталей, которые должны иметь постоянные размеры с изменением температуры. Меняя содержание никеля в интервале концентрации от 30 до 50 %, можно получать сплавы с различными коэффициентами расширения. Так, например, при содержании $42 \div 48\%$ Ni и $0,3\%$ C (остальное железо) получается сплав с коэффициентом расширения таким же, как для платины и стекла. Этот сплав, названный платинитом, служит заменителем платины в изделиях, где соединения стекла с металлом требуют одинакового расширения при нагревании (например, вводы в лампы накаливания).

Сплавы никеля с железом с добавками кобальта (ковар), содержащие от 20 до 30 % Ni и от 20 до 40 % Co, имеют нулевой или даже отрицательный коэффициент линейного расширения.

В железоникелевых сплавах при содержании Ni около 80 % магнитная проницаемость резко возрастает и превосходит 10000 гс/эрст . Сплав такого состава, содержащий 78,5 % Ni и 21,5 % Fe, называется пермаллоем. Высокие магнитные свойства сплав приобретает после

специальной термической обработки — гомогенизации при 1200 °С в атмосфере водорода, вторичного нагрева до 600 °С с последующим охлаждением со строго определенной скоростью. Этот сплав применяют для деталей приборов, которые должны сильно намагничиваться даже в слабых магнитных полях (в приборах слаботочной промышленности).

Для постоянных магнитов с большим остаточным намагничиванием, с большой коэрцитивной силой получили распространение сплавы системы Ni-Al-Fe (ални) и Ni-Al-Fe-Co (алнико). Высокие магнитные свойства этих сплавов достигаются в результате специальной термической обработки (заковки и отпуска, нормализации и т. д.). В процессе отпуска из закаленного сплава выделяются частицы различных интерметаллидов (Ni_3Al , FeAl и др.), которые не только повышают механические свойства сплавов, но и увеличивают коэрцитивную силу.

В качестве немагнитных материалов применяют сплавы тройной системы Ni-Fe-C (25 % Ni, 2,5 % Cr, 0,3 % C, остальное Fe) и четверной системы Ni-Fe-Cr-Mn (12 % Ni, 4 % Cr, 5 % Mn, 0,5 % C, остальное Fe). Эти сплавы после заковки с 900 °С в масле имеют аустенитную структуру с магнитной проницаемостью, близкой к единице.

4.5.5. Применение никеля и его сплавов

В настоящее время никель применяется в различных отраслях техники, в электронике, радиотехнике и телевидении, является основной составляющей жаропрочных сплавов. Большое значение никель имеет как легирующий элемент в конструкционных сталях. Он придает сплавам разнообразные ценные свойства: повышает пластичность, вязкость и снижает температуру вязкохрупкого перехода, повышает кислотостойкость, жаропрочность, уменьшает коэффициент теплового расширения, изменяет магнитные свойства, придает сплавам красивый внешний вид и т. д.

Добавки от 2 до 5÷6 % никеля в конструкционные стали улучшают их качество, увеличивают прочность и стойкость против коррозии. Стали с содержанием 6÷8 % никеля и 18÷22 % хрома обладают большой кислотостойкостью, применяются в химической промышленности и в гидрометаллургических производствах цветной металлургии.

В электронной технике применяются новые железоникелевые сплавы, в том числе магнитные, с заданным коэффициентом расширения и другие. Проволока из нихрома применяется в качестве сплава сопротивления в электрических печах.

Распространены в промышленности и быту сплавы никеля с медью — мельхиоры. Они пластичны, легко подвергаются обработке давлением, резанием, сварке, пайке. К распространенным медно-никелевым сплавам прежде всего следует отнести сплав мельхиор. Его применяют в химической промышленности и судостроении, для теплообменников, медицинского инструмента и в других областях техники, где к изделиям предъявляют высокие требования в отношении прочности и коррозионной стойкости. Кроме того, этот сплав нашел применение в ювелирном деле и для архитектурных украшений.

Сплавы на основе никеля получили широкое применение как жаропрочные материалы в современных турбинах и реактивных двигателях. В настоящее время из деформируемых жаропрочных никелевых сплавов производят прутки, профили, трубы, листы, проволоку, поковки и штамповки, которые используют для изготовления наиболее теплонапряженных деталей газотурбинных двигателей и других силовых установок, работающих при высоких температурах.

Формы для литья под давлением не подвергаются высоким механическим нагрузкам, однако введение расплавленного металла вызывает весьма большие температурные напряжения. Кроме того, чтобы выдерживать влияние быстрых смен температур, материал формы должен иметь высокое сопротивление окислению и быть устойчивым против эрозии струей расплавленного металла. В этих случаях применяют также сплавы типа нимоник.

Никелевые сплавы нашли широкое применение в электротехнике. Из них изготавливают термопары, резисторы и т. д.

Хромель НХ9,5 применяют в термопарах (положительный электрод), а хромель НХ9 — в качестве компенсационных проводов.

Алюмель применяется для термопар как отрицательный электрод в паре с хромелем НХ9,5. Термопары алюмель-хромель можно применять для измерения температур от 300 до 1000 °С. При 1000 °С такая термопара развивает термоэлектродвижущую силу в два раза большую, чем термопара платина-платинородий.

Нихром является основным сплавом для нагревательных элементов печей с рабочей температурой до 1000 °С.

4.5.6. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из никелевых сплавов

Рабочие лопатки газотурбинных авиационных двигателей, помимо действия высокотемпературного газового потока, подвергаются влиянию значительных растягивающих центробежных, а также изгибных и вибрационных нагрузок. Выбрать жаропрочный и жаростойкий материал для рабочих лопаток, работающих длительное время в условиях нагрева до температуры 1000 °С и кратковременных нагревов до 1050 °С. Привести состав сплава, технологию его обработки, структуру и свойства при рабочих температурах.

Решение. При высоких рабочих температурах серийных авиационных газотурбинных двигателей основным конструкционным материалом для изготовления лопаток турбин служат исключительно литейные никелевые жаропрочные сплавы серии ЖС. Наиболее известны жаропрочные литейные сплавы серии ЖС: ЖСЗ, ЖС6, ЖС6К, ЖС6У, ЖС6Ф. Для удовлетворения требований, поставленных в условиях задачи, подойдет сплав ЖС6К, имеющий высокие показатели предела длительной прочности: $\sigma_{100}^{1000} = 190$ МПа и $\sigma_{100}^{1020} = 120$ МПа.

Такие показатели длительной прочности при рабочих температурах обеспечиваются при получении методом направленной кристаллизации монокристаллических лопаток с заданной кристаллографической ориентацией. Термическая обработка лопаток состоит в высокотемпературной закалке (нагрев 1200÷1220 °С, 4 ч, охлаждение на воздухе) и старении при 950 °С, 16 ч. При термообработке необходимо применять защитные атмосферы или специальные обмазки. Лопатки после термообработки имеют однородную, дисперсную ($\gamma + \gamma'$)-структуру с высокой объемной долей упрочняющей γ' -фазы (свыше 50 %) размером 0,3÷0,4 мкм. Для повышения жаростойкости лопаток в процессе эксплуатации требуется подвергнуть их газоциркуляционному хромоалитированию.

.....

Глава 5

Использование компьютерных программ для решения задач по выбору материалов и технологий

.....

5.1. Описание программного комплекса СТАЛЬ

Классическая задача, которую надлежит решать материаловеду в соответствии с конструкторскими заданиями, — это поиск приемлемого материала для конкретной детали или узла устройства. При этом не может быть однозначного и простого решения, поскольку при выборе сплава приходится учитывать комплекс ведущих характеристик, в первую очередь прочности, надежности и долговечности. Вместе с тем нужно учитывать технологию изготовления детали, экономию металла, специфические условия службы детали (температура, среда, скорость нагружения и прочие важные факторы).

Естественно возникает вопрос, как наиболее грамотно, быстро и квалифицированно выбрать для обсуждаемой детали необходимый материал, а также требуемую технологию его обработки, позволяющие обеспечить заданный эксплуатационный ресурс. Каким образом получить искомый результат?

Есть такое высказывание: знание может быть двух видов — мы либо знаем предмет сами, либо знаем, где можно найти сведения о нем. Или по-другому: человек образованный — это тот, кто знает, где найти то, чего он не знает.

Нужные сведения можно получить разным способом — это информация из справочной литературы, монографий, периодических изданий. Очень мощным источником полезных знаний представляется, конечно, Интернет. Наконец, весьма ценным является личный

опыт, хотя и его возможности могут иметь ограниченный характер, поскольку все возникающие ситуации знать и предусмотреть просто не реально.

В этих условиях весьма заманчивым представляется использование современных информационных сред, построенных на компьютерных технологиях. В настоящее время известны различные разработки в этой области, к которым относятся программные комплексы выбора стали. Один из современных и продуктивных методов решения задач по выбору — это использование базы данных (БД) по машиностроительным материалам. Напомним, что базой данных принято считать совокупность самостоятельных материалов (статей, расчетов, нормативных актов и проч.), систематизированных таким образом, чтобы эти материалы могли быть найдены и обработаны с помощью компьютерной техники. Поэтому любые внекомпьютерные хранилища информации (архивы, библиотеки, картотеки и т. п.) базами данных не являются.

К указанным выше информационным технологиям относится оригинальный программный комплекс выбора марки сталей под названием СТАЛЬ, разработанный доцентом И. М. Мальцевым из Нижегородского государственного технического университета (рис. 5.1).

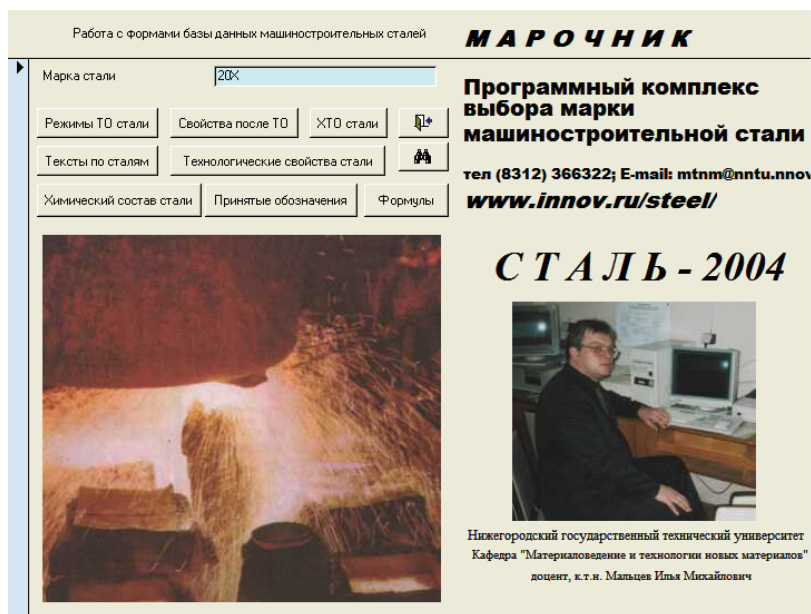


Рис. 5.1. Заставка программного комплекса СТАЛЬ

Программа СТАЛЬ представляет собой автономный программный модуль и базы данных, связанные воедино.

Программный модуль СТАЛЬ (рис. 5.2) предназначен для поиска марки стали по конструкционным и технологическим критериям. В нем заложено более 192 комбинаций поиска, предусмотрен вывод дополнительной информации в виде данных о назначении и технологии. При этом необходимые сведения для такого поиска и выбора основываются на использовании достаточно полной системы управления базой данных.

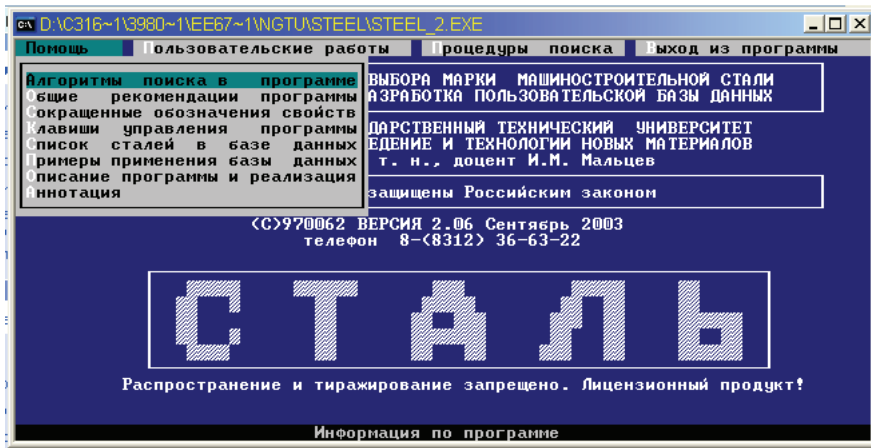


Рис. 5.2. Интерфейс программного модуля СТАЛЬ

Пользователем при обращении к программному комплексу СТАЛЬ формулируются запросы в виде одного из восьми общепринятых вариантов поиска стали, в том числе по физико-механическим, технологическим свойствам, химическому составу. Итоговый результат решения обсуждаемой задачи будет представлять собой выборку (список) сталей, соответствующих критериям введенных пользователем запросов.

Заложенная в программном комплексе СТАЛЬ база данных представляет собой фактически электронную версию достаточно традиционного справочника по машиностроительным сталям. В этом справочнике приведены свойства более 800 марок широко применяемых машиностроительных сталей. В нем в табличной форме указаны сведения по термообработке, обработке давлением и резанием, сварке, применению стали, особенностям ее эксплуатации и т. п. Информа-

ция отображается на дисплее в виде картотеки таблиц и текстов. Итоги работы можно вывести на принтер как документ.

В базе данных содержатся: прочностные, упругие, усталостные характеристики (σ_B , σ_{-1} , $\sigma_{0.2}$, E , δ , G , ψ , τ_{-1} , KCU , $T_{\text{экспл}}$), режимы термической и химико-термической обработки; назначение и области применения, характеристики стали, включающие сведения по особенностям термической и химико-термической обработки, сведения о склонности к обезуглероживанию, способах сварки, категории свариваемости, чувствительности к перегреву, типах изготавливаемых деталей, роли легирующих элементов, заменителей сталей, коррозионной стойкости и других свойствах, прокаливаемости, рекомендации по типовым (стандартным) вариантам термической и химико-термической обработки, показатели эксплуатации, резания, сварки и обработки давлением; данные химического состава, критических температур сталей и другие сведения; данные ГОСТ по сталям и стальной продукции.

Программный комплекс СТАЛЬ содержит следующие группы сталей: конструкционные легированные, рессорно-пружинные, обыкновенного качества, подшипниковые, углеродистые качественные конструкционные, литейные, повышенной обрабатываемости (автоматные), углеродистые инструментальные, коррозионно-стойкие, инструментальные легированные (в том числе быстрорежущие), мартенситно-старееющие, порошковые, строительные, с карбонитридным упрочнением, теплоустойчивые и т. п.

Данный программный комплекс позволяет создавать выборку сталей из имеющихся записей базы данных, систематизированных по прокаливаемости, физико-механическим свойствам сталей после термической или химико-термической обработки, учесть относительную стоимость выбранного материала, а также использовать и другие полезные сведения.

5.2. Пример решения задачи с использованием программного модуля СТАЛЬ

***Задача.** Для изготовления цилиндра экструдера¹ с толщиной стенки 20 мм, работающего при $T=200^{\circ}\text{C}$, требуется сталь с временным сопротивлением не менее 1200 МПа. Выбрать сталь и требуемые режимы ее обработки.*

Предварительно следует высказать некоторые соображения. Прежде всего нужно будет приравнять толщину стенки к диаметру заготовки. Тем самым при выборе марки стали для цилиндра экструдера будет учтен такой важный технологический показатель, как прокаливаемость. Значение временного сопротивления оставляем без изменения. Для устранения износа необходимо будет обеспечить высокую твердость поверхности. Поэтому целесообразно предусмотреть операцию химико-термической обработки (ХТО) — для цилиндра экструдера нужно учесть проведение цементации. При этом следует помнить, что назначение ХТО будет приводить к очевидному удорожанию оснастки. При назначении поверхностной обработки и численного значения твердости принято учитывать программу выпуска формовок на одной технологической оснастке. Считается, что для обеспечения умеренной программы выпуска в количестве до 10000 шт. твердость поверхности цилиндра должна составлять $45\div 50$ HRC. Поэтому для данного случая примем твердость после цементации, равную 48 HRC.

5.2.1. Последовательность решения задачи

Использование программного комплекса СТАЛЬ для решения задач по выбору материала и технологии основано на том, что пользователь имеет доступ к терминалу вычислительного центра металлургического факультета УрФУ, который содержит данный информационный ре-

¹ Экструдер (или червячный пресс) — машина для размягчения (пластикации) материалов и придания им формы путем продавливания через профилирующий инструмент (т. н. экструзионную головку), сечение которого соответствует конфигурации изделия. Фактически экструдер представляет собой устройство, похожее на большую мясорубку.

курс. Сама программа любезно предоставлена университету автором этой разработки доц. И. М. Мальцевым.

Ниже дается подробная пошаговая инструкция пользования программой, снабженная краткими комментариями.

1. Запускаем программу СТАЛЬ. Для этого в папке МАРОЧНИК_М активизируем опции NGTU/STEEL/STEEL_2.EXE. Появится знакомая уже информационная панель СТАЛЬ (рис. 5.2).

2. В падающем меню программы выбираем курсором команду ПРОЦЕДУРЫ ПОИСКА (рис. 5.3).

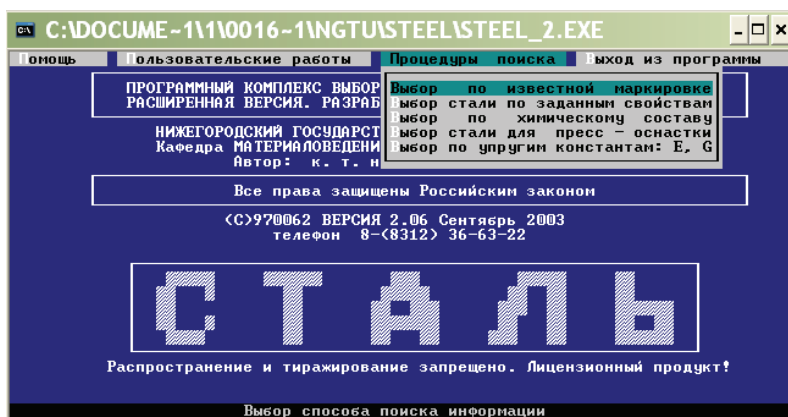


Рис. 5.3. Падающее меню программы СТАЛЬ

3. В контекстном меню курсором выделяем раздел ВЫБОР СТАЛИ ПО ЗАДАНЫМ СВОЙТВАМ (рис. 5.4).

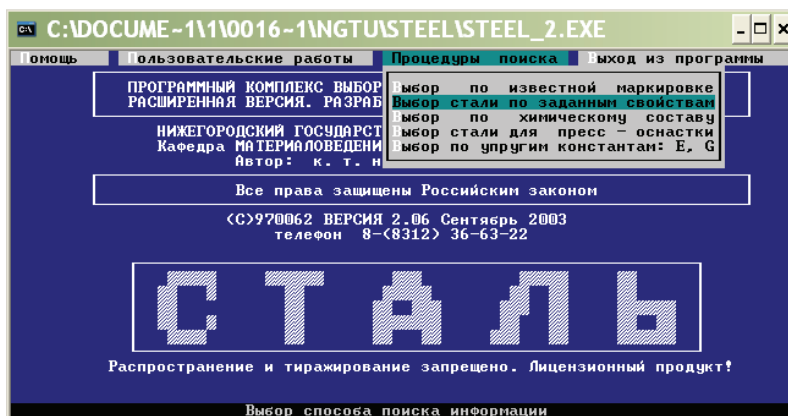


Рис. 5.4. Контекстное меню программы СТАЛЬ

4. В новом всплывающем окне курсором указываем раздел БАЗА ДАННЫХ ПРОГРАММЫ СТАЛЬ-СТАНДАРТ (рис. 5.5).

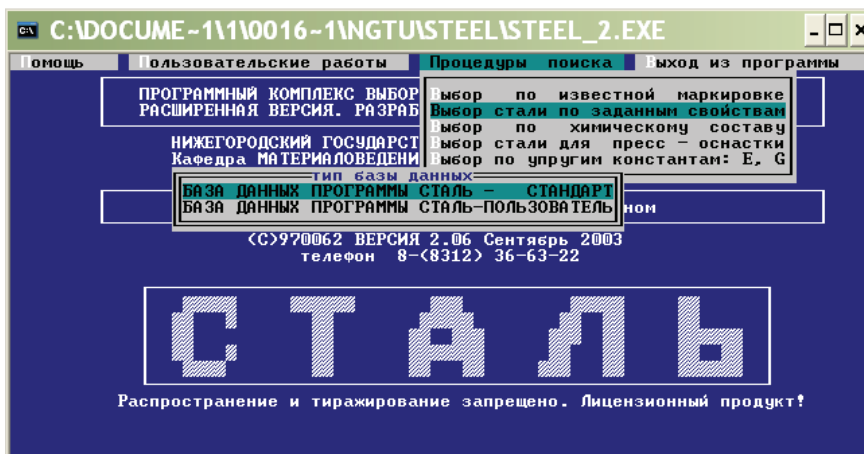


Рис. 5.5. Выбор раздела БАЗА ДАННЫХ ПРОГРАММЫ СТАЛЬ-СТАНДАРТ

5. Затем появится окно под названием Метод-поля, в нем отмечаем курсором раздел БАЗА ДАННЫХ БЕЗ ОБРАБОТКИ Метод-ПОЛЕЙ (рис. 5.6).

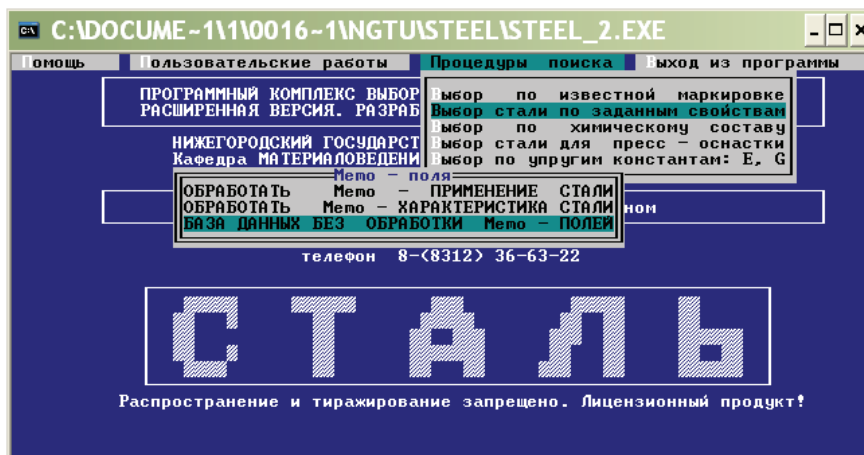


Рис. 5.6. Информационное Метод-поле в программе СТАЛЬ

6. В появившемся главном окне программы вводим числа 20 для строки **Диаметр заготовки** и 1200 в строке **Временное сопротивление**. Для этого нужно будет навести курсор на «0», затем нажать левую кла-

вишу мыши (под нулем появится красный мигающий курсор, который можно перемещать в нужное положение с помощью стрелок на клавиатуре) и ввести требуемое значение с помощью клавиатуры (рис. 5.7).

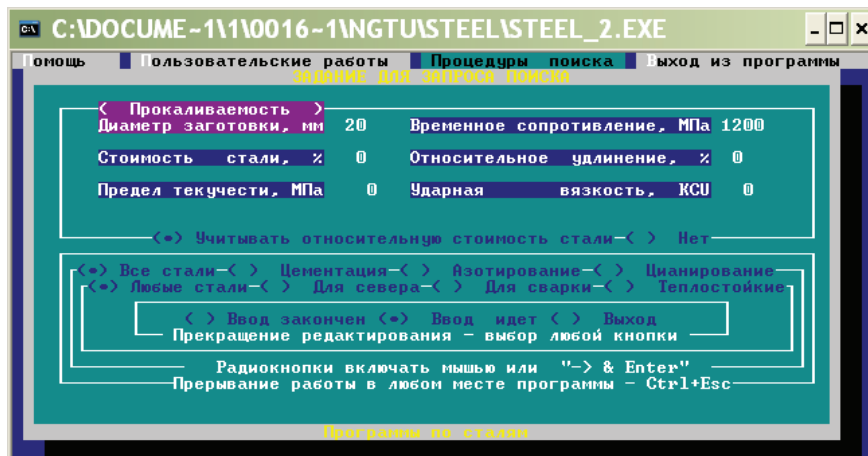


Рис. 5.7. Регистрация заданных показателей

7. Оставшиеся незаполненные строки сохраняем без изменений (со значениями, равными нулю).

8. В нижней части панели мышью устанавливаем радиокнопку в положение **ЦЕМЕНТАЦИЯ**, для чего поставим точку в круглые скобки перед опцией **Цементация**. Радиокнопки следующей строки оставляем без изменений (рис. 5.8).

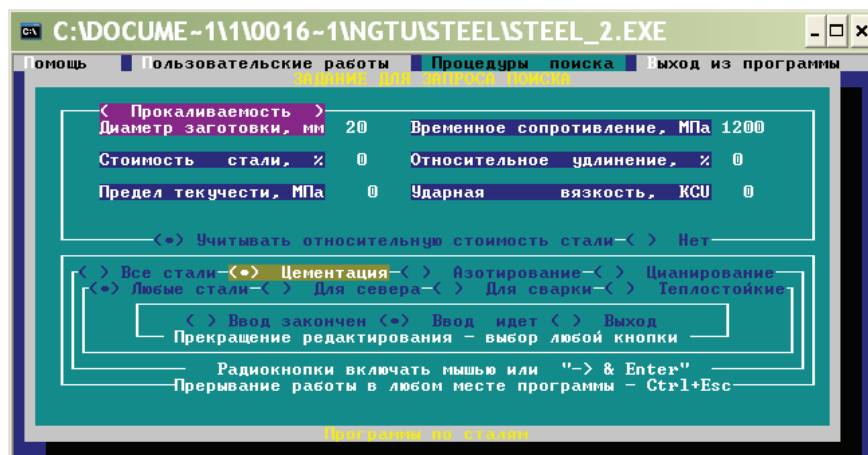


Рис. 5.8. Активизация опции ЦЕМЕНТАЦИЯ

9. В четвертой строке радиокнопок левой клавишей мыши устанавливаем положение ВВОД ЗАКОНЧЕН (рис. 5.9).

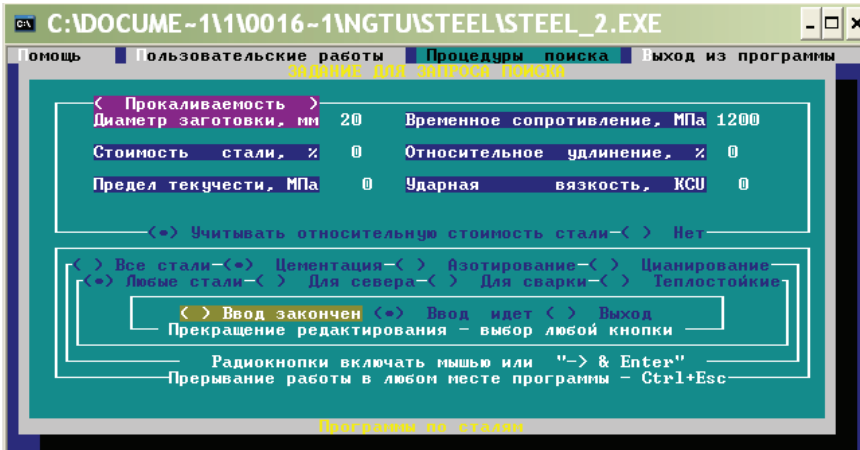


Рис. 5.9. Завершение процедуры ввода

10. В новом всплывающем окне **Дополнительные критерии отбора** вводим число 48 в строке ТВЕРДОСТЬ ПОСЛЕ ХТО и выбираем команду УЧИТЫВАТЬ (рис. 5.10). После этого появится второе окно **Дополнительные критерии отбора**.



Рис. 5.10. Ввод данных по твердости после цементации

11. Второе дополнительное окно отбрасываем. Для этого нажимаем клавишу Enter и в появившейся панели в строке радиокнопок ле-

вой клавишей мыши делаем отметку в скобках слева от слова **Отбросить** (рис. 5.11).



Рис. 5.11. Второе дополнительное окно

12. После этого в окне появятся сводные данные (рис. 5.12). В панели **ВЫБОРКА СТАЛЕЙ** можно ознакомиться с выводимой информацией ответа. Как видно, программа в соответствии с заданными параметрами из имеющейся базы данных выдала целую группу сталей (пять марок) с регламентированными для них показателями механических свойств (предел текучести σ_T , временное сопротивление σ_B и т.д.).



Рис. 5.12. Сводные данные по результатам запроса

Если поместить курсор в верхнюю панель активного окна (это окно с символами, размещенными в полях рамки) и нажать, и не отпускать левую кнопку мыши, то можно «отбуксировать» окно в удобное место экрана (рис. 5.13).



Рис. 5.13. Возможность буксировка окна *Выборка сталей*

Если подвести курсор к верхнему правому углу окна (там указана буква Е) и нажать левую кнопку мыши — окно «распахнется» во весь экран (рис. 5.14).



Рис. 5.14. Возможность развернуть окно

Повторное действие приводит к обратному результату (рис. 5.15).



Рис. 5.15. Обратная процедура — свернуть окно

Два символа «ползунки» на правой рамке окна служат для прокрутки текста или данных в узком окне. Они запускаются при нажатии левой кнопки мыши (рис. 5.16).



Рис. 5.16. Ползунки для перемещения табличных данных

13. Для того чтобы вывести на экран следующее окно данных, нужно нажать на желтый прямоугольник в левом верхнем углу окна **Выборка сталей** — появится окно **Ответ для минимальной стоимости** (рис. 5.17). При нажатии на такой прямоугольник в каждом новом появившемся окне будет открываться следующая информация.

С учетом стоимостного фактора программа из числа альтернативных материалов рекомендует сталь 25ХГТ — как более экономичную (рис. 5.17).



Рис. 5.17. Выбор стали по стоимостному критерию

Затем для выбранной стали в определенном порядке можно получить подробные сведения технологического характера. Для этого каждый раз следует нажимать указанный прямоугольник.

При этом информационные окна на экран будут выводиться в следующем порядке:

1. **Рекомендуемые режимы термической обработки** — эти сведения можно увидеть в верхнем окне (рис. 5.18).

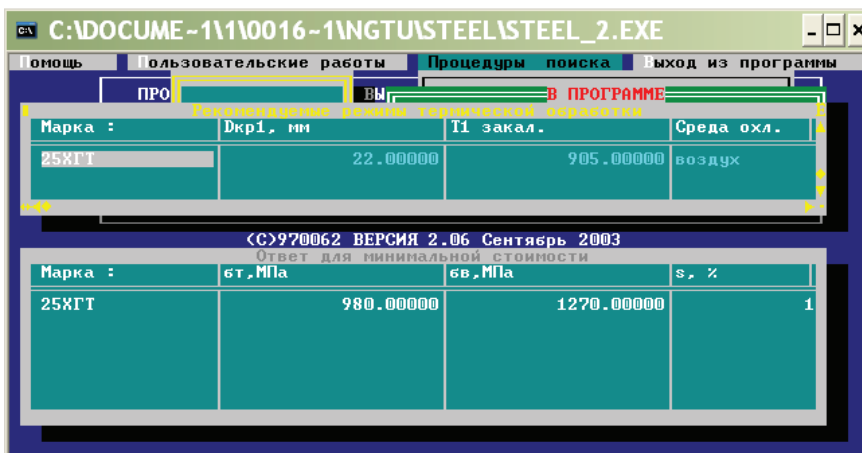


Рис. 5.18. Информация о рекомендуемых режимах термообработки

2. Известное применение стали — в всплывающем окне дается полезная информация о предпочтительном применении стали в качестве машиностроительного материала (рис. 5.19).

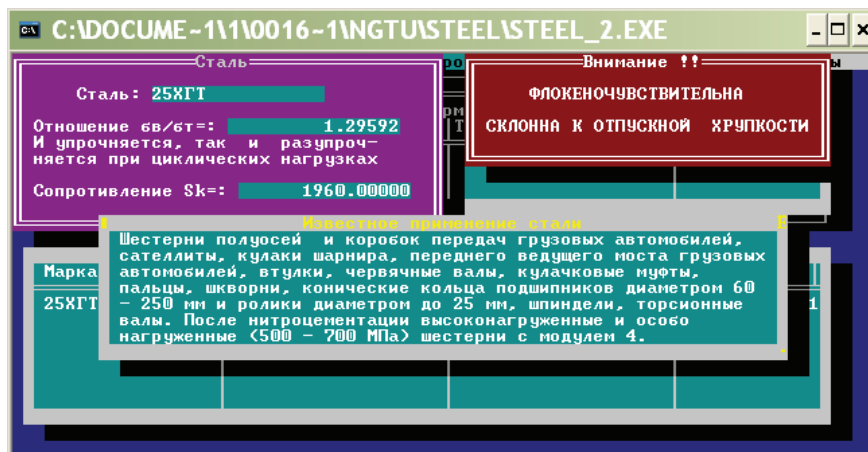


Рис. 5.19. Информация о применении стали

3. Данные для технолога-термиста и материаловеда — в основном приводятся сведения из ГОСТа (рис. 5.20).

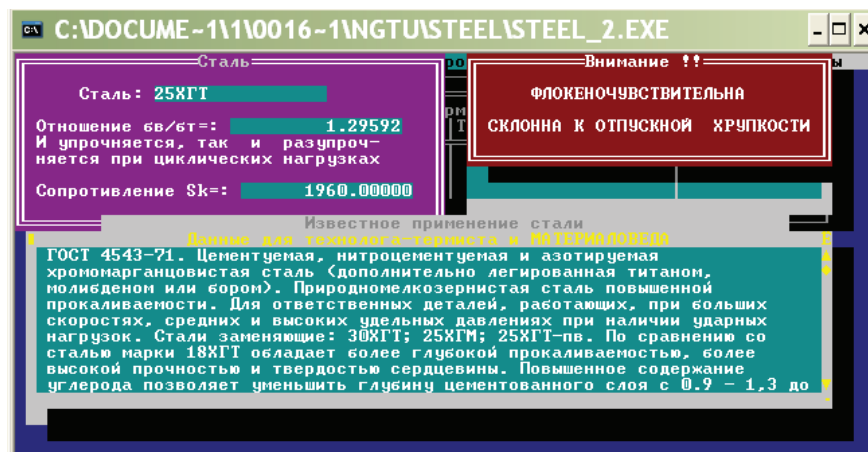


Рис. 5.20. Стандартная информация по выбранной стали

4. Данные по технологии стали — сообщаются данные, характеризующие регламентируемые показатели технологических свойств (рис. 5.21).

Скриншот программы STEEL_2.EXE. В меню: Помощь, Пользовательские работы, Процедуры поиска, Выход из программы.

Данные по технологии стали

| Марка : | НВ отжиг | НВ резан. | Kv*100 тверд |
|---------|-----------|-----------|--------------|
| 25XГТ | 217.00000 | 240.00000 | 8 |

С<970062 ВЕРСИЯ 2.06 Сентябрь 2003

Ответ для минимальной стоимости

| Марка : | бт, МПа | бв, МПа | с, % |
|---------|-----------|------------|------|
| 25XГТ | 980.00000 | 1270.00000 | 1 |

Рис. 5.21. Данные по технологии стали

5. Данные по технологии ХТО стали — указываются сведения, касающиеся получаемых свойств после цементации (рис. 5.22).

Скриншот программы STEEL_2.EXE. В меню: Помощь, Пользовательские работы, Процедуры поиска, Выход из программы.

Данные по технологии стали

| Марка : | НВ отжиг | НВ резан. | Kv*100 тверд |
|---------|-----------|-----------|--------------|
| 25XГТ | 217.00000 | 240.00000 | 8 |

Данные по технологии ХТО стали

| Марка : | HRC пов. | НВ сердц. | Т С хто |
|---------|----------|-----------|---------|
| 25XГТ | 64.00000 | 240.00000 | 94 |

Рис. 5.22. Сведения о результатах химико-термической обработки

6. Данные по химическому составу стали — название говорит само за себя (рис. 5.23).

The screenshot shows a software window titled "C:\DOCUME~1\11\0016~1\NGTU\STEEL\STEEL_2.EXE". It has a menu bar with "Помощь", "Пользовательские работы", "Процедуры поиска", and "Выход из программы". Below the menu is a table with the following data:

| Марка : | НВ отжиг | НВ резан. | Kv*100 тверд |
|-------------------------------------|----------|-----------|--------------|
| Данные по химическому составу стали | | | |
| Марка : | C< | >C | Si< |
| 25XГТ | 22.00000 | 29.00000 | 1 |

Рис. 5.23. Сведения о химическом составе выбранной стали

7. **Критические температуры** — приводятся данные, характеризующие критические точки данной стали A_{C1} , A_{C3} , M_H (рис. 5.24).

The screenshot shows the same software window as Figure 5.23, but with an additional data row and a pop-up window. The table data is as follows:

| Марка : | НВ отжиг | НВ резан. | Kv*100 тверд |
|-------------------------------------|----------|-----------|--------------|
| Данные по химическому составу стали | | | |
| Марка : | C< | >C | Si< |
| 25XГТ | 22.00000 | 29.00000 | 1 |
| 25XГТ | 720.000 | | |

A pop-up window titled "Критические температуры" is overlaid on the table, showing:

| | |
|---------|----------|
| Марка : | A_{C1} |
| 25XГТ | 720.000 |

Below the table, a note states: "В таблице числа умножены на 100".

Рис. 5.24. Сведения о критических точках

Таким образом, для рассмотренного примера возможным представляется применение сталей 27ХГР, 25ХГТ, 30ХГТ, 18ХГН, 25ХГН. Однако минимальная относительная стоимость характерна для стали 25ХГТ. Поэтому с учетом экономических соображений надлежит использовать именно ее для изготовления цилиндра экструдера.

5.2.2. Комментарии для пользователя

Для пользователя программного комплекса будут полезны некоторые пояснения, которые автор разработки посчитал целесообразным сформулировать.

1. Надпись **RANGE: 1 to 400 (press spase)** означает, что пользователь ввел недопустимое численное значение. Необходимо нажать клавишу пробел (**spase**) и откорректировать значение.

2. Обычно при работе программы СТАЛЬ в правом верхнем углу дисплея выводится подсказка, комментирующая ход программы и особенности ввода. С экрана она удаляется любым движением мыши или нажатием клавиши.

3. Клавиши управления в программе СТАЛЬ:

3.1. **+** и **&** — это символы одновременного нажатия клавиш;

3.2. **Ctrl+Q** — выход в DOS;

3.3 **Ctrl+W, Alt+F10** — выход в главное меню;

3.4. **СТРЕЛКИ ->** — выбор пунктов меню или прокрутка содержания в активном информационном окне (выбор пунктов меню завершается нажатием клавиши **Enter** или двойным нажатием левой кнопки мыши);

3.5. **Ctrl+End** — переход в новое (следующее) окно (переход в новое или соседнее окно также осуществляется перемещением курсора в неактивное окно и нажатием левой кнопки мыши);

3.6. **Esc** — возврат в главное или вызывающие меню; кроме того, **Esc** стирает информационные окна, выведенные на экран;

3.7. **Alt+Enter** — раскрытие окна во весь экран дисплея. Чтобы выйти из этого режима, достаточно нажать эти клавиши повторно.

5.3. Пример решения задачи с использованием базы данных программного комплекса СТАЛЬ

Главное окно, или окно работы с формами СТАЛЬ, показано на рис. 5.25. Пользователь с помощью программы управления базами данных ACCESS, вводя известную маркировку, может найти информацию по каждому из разделов материаловедения — от термиче-

ской обработки до конечных свойств. Например, обращение к форме «Тексты по сталям», представленной на рис. 5.26, дает возможность в дальнейшем получить разнообразную и достаточно исчерпывающую информацию для обсуждаемой марки стали.

В качестве примера на рис. 5.27÷5.31 представлены различные сведения о конструкционной стали 20Х, включая ее характеристику (назначение, область применения), уровень свойств, принятые режимы обработки, химический состав и т. д.

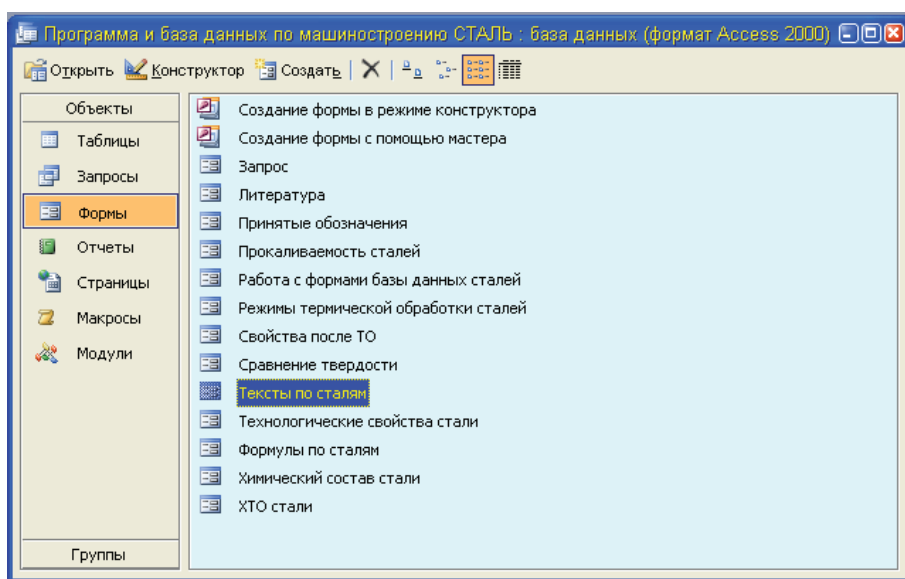


Рис. 5.25. Окно работы с формами программы СТАЛЬ

| Текстовая информация по машиностроительной стали | |
|---|---|
| Марка стали | 20Х |
| Применение стали в машиностроении | Поршневые пальцы, мелкие шестерни, оси, толкатели, кулачковые муфты, втулки, направляющие планки, шпиндели, плунжеры, оправки, червячные валы, копиры, поршневые кольца, упорные диски и крестовины, распределительные валы двигателей МеМЗ. |
| Металловедческое описание стали | ГОСТ 4543-71. Хромистая цементуемая сталь повышенной прочности для небольших деталей, работающих на износ в условиях трения, при средних удельных давлениях и скоростях. ТО - цементация с двойной или одинарной объемной закалкой или Т.В.Ч. после цементации или после цементации и полировки. Цементация |
| Склонность стали к флокенам, обозначение: nfl - мало склонна, nfl - несклонна, fl - склонна | nfl |
| Склонность стали к отпускной хрупкости, обозначение: nso - несклонна, sh - склонна | nso |

Рис. 5.26. Форма *Текстовая информация по сталям*

| Физико-механические свойства стали после термической обработки | |
|--|--------|
| Марка машиностроительной стали по ГОСТ или ТУ | 20X |
| Предел текучести стали, МПа | 355 |
| Временное сопротивление стали при растяжении, МПа | 590 |
| Относительное удлинение при растяжении, % | 17 |
| Относительное сужение при растяжении, % | 45 |
| Ударная вязкость стали при комнатной T, С в КСЧ | 59 |
| Критический диаметр прокаливаемости min, мм | 14 |
| Критический диаметр прокаливаемости max, мм | 26 |
| Стоимость стали в условных единицах | 120 |
| Предел выносливости при нагружении растяжением, МПа | |
| Предел выносливости при нагружении кручением, МПа | |
| Модуль Юнга, Е | 207000 |
| Модуль G | 0 |
| Плотность стали, кг/м ³ | 7740 |
| Твердость после отжига в НВ | 179 |
| Твердость после термической обработки в НВ | 179 |

Рис. 5.27. Форма *Физико-механические свойства стали*

| Режимы термической обработки стали или состояние стали | |
|--|--------------|
| Марка стали | 20X |
| Температура первой закалки, С | 880 |
| Среда охлаждения первой закалки | вода |
| Температура второй закалки, С | 795 |
| Среда охлаждения второй закалки | вода_масло |
| Температура отпуска после закалки стали, С | 600 |
| Среда охлаждения при отпуске | воздух_масло |






Рис. 5.28. Форма *Режимы термической обработки*

| Сведения по технологическим свойствам машиностроительной стали | | |
|--|-----|------|
| Марка стали | | 20X |
| NT | | 1 |
| Индекс принадлежности к сталям, которые эксплуатируются при нагреве | | |
| Температура эксплуатации стали при повышенных и высоких температурах, С | | 0 |
| Категория свариваемости стали, 1- без ограничений, 2,3, 4 - хуже свариваются | | 1 |
| Критическая температура стали, С | AC1 | 735 |
| Критическая температура стали, С | AC3 | 870 |
| Критическая температура стали, С | AR3 | |
| Критическая температура стали, С | AR1 | 720 |
| Индекс БД принадлежности стали к северному исполнению, (СЕВЕР) | S | 1 |
| Температура эксплуатации стали в северных условиях, "минус" С | | 50 |
| Критический размер (диаметр) изделия из стали северного исполнения, мм | | 10 |
| Температура начала ковки стали, С | | 1260 |
| Температура конца ковки стали, С | | 750 |
| Коэффициент обрабатываемости резанием твердым сплавом (X 100) | | 170 |
| Коэффициент обрабатываемости резанием быстрорежущей сталью (X 100) | | 130 |

Рис. 5.29. Форма *Сведения по технологическим свойствам машиностроительной стали*

| Химический состав машиностроительной стали | | | |
|--|-----|-----------|--|
| В ТАБЛИЦЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТА УМНОЖЕНО НА 100 | | | |
| Марка стали (по ГОСТ или ТУ) | | 20X | |
| C min, % | 12 | Al min, % | |
| C max, % | 18 | Al max, % | |
| Si min, % | 17 | Ti min, % | |
| Si max, % | 37 | Ti max, % | |
| Mn min, % | 50 | V min, % | |
| Mn max, % | 70 | V max, % | |
| Cr min, % | 70 | Cu min, % | |
| Cr max, % | 100 | Cu max, % | |
| Ni min, % | | W min, % | |
| Ni max, % | | W max, % | |
| Mo min, % | | | |

Рис. 5.30. Форма *Химический состав машиностроительной стали*

Химико-термическая обработка стали

| | |
|--|------------|
| Марка машиностроительной стали | 20Х |
| Вид ХТО стали: zz - цементация, zn- цианирование, np- азотирование | zz |
| Цифровой индекс БД ХТО стали | 1 |
| Твердость стали после ТО и ХТО в HRC | 59 |
| Температура ХТО, С | 910 |
| Среда охлаждения после ХТО | воздух |
| Температура закалки после ХТО, С | 770 |
| Среда охлаждения после ХТО и закалки | масло |
| Температура отпуска после ХТО и закалки, С | 180 |
| Среда охлаждения после отпуска | возд-масло |

Рис. 5.31. Форма Химико-термическая обработка стали

База данных программного комплекса СТАЛЬ позволяет также в табличной форме представить информацию по целому набору марок сталей, отвечающих критериям введенного запроса (рис. 5.32).

■ UG_STEEL : таблица

| MARKASTEEL | T1_ZAKALKA | SR_ZAKALKI | T2_ZAKALKA | SR_OHLAGD | T_OTPUSKA | SR_OHL_OTP | LIM_TEKUCH | BP_SOPROT |
|------------|-----------------|------------|----------------|-----------|------------------|------------|------------|-----------|
| 15Х | 880 вода | | 795 вода_масло | | 600 воздух_масло | | 365 | 590 |
| 20Х | 880 вода, масло | | 795 вода_масло | | 180 воздух_масло | | 635 | 780 |
| 30Х | 860 | | 0 масло | | 500 вода_масло | | 685 | 880 |
| 30ХРА | 900 воздух | | 860 масло | | 200 воздух | | 785 | 800 |
| 35Х | 860 | | 0 масло | | 500 воздух | | 735 | 910 |
| 38ХА | 860 | | масло | | 550 вода_масло | | 785 | 930 |
| 40Х | 860 | | масло | | 500 вода_масло | | 785 | 980 |
| 45Х | 840 | | масло | | 520 масло | | 835 | 890 |
| 50Х | 830 закалка | | масло | | 520 масло | | 885 | 1167 |
| 15Г | 880 вода | | воздух | | | | 245 | 410 |
| 20Г | 880 вода, масло | | воздух | | | | 275 | 410 |
| 25Г | 880 | | вода_воздух | | 560 воздух | | 295 | 490 |
| 30Г | 860 | | вода_воздух | | 600 воздух | | 315 | 540 |
| 35Г | 860 | | вода_воздух | | 600 воздух | | 335 | 560 |
| 40Г, 40ГР | 860 | | вода_воздух | | 600 воздух | | 355 | 590 |
| 45Г | 850 | | масло_воздух | | 600 воздух | | 375 | 620 |
| 47ГТ | 845 | | воздух | | | | 375 | 620 |
| 10Г2 | 920 вода | | воздух | | 0 | | 245 | 420 |
| 30Г2 | 880 | | масло_воздух | | 600 воздух | | 365 | 620 |
| 35Г2 | 870 | | масло_воздух | | 650 воздух | | 365 | 620 |
| 40Г2 | 860 | | масло_воздух | | 650 воздух | | 380 | 660 |

Рис. 5.32. Фрагмент главной таблицы программы СТАЛЬ

Теперь познакомимся с приемами пользования базами данных на конкретном примере.

Задача. Найти сталь-заменитель для детали «Плита», изготовленной из стали 45, критический диаметр 25 мм и твердость 355 НВ. Сталь должна иметь предел текучести σ_T не менее 700 МПа.

5.3.1. Последовательность решения задачи

Итак, для поиска подходящей стали-заменителя воспользуемся имеющейся базой данных, которую содержит программный комплекс СТАЛЬ. Кстати, в подобной ситуации при отсутствии компьютерных средств пришлось бы действовать примерно так: если бы под рукой оказался хороший марочник машиностроительных сталей, снял бы его с книжной полки, нашел по оглавлению нужные страницы — и погрузился в увлекательное чтение...

Действуем в следующей последовательности.

1. Запускаем Программный комплекс СТАЛЬ. Для этого в папке МАРОЧНИК_М активизируем опции NGTU/СТАЛЬ ДЛЯ ВУЗов/Программа и база данных по машиностроению СТАЛЬ.mdb.

2. В меню области переходов выбираем фильтр по группам — *Запросы* (рис. 5.33).

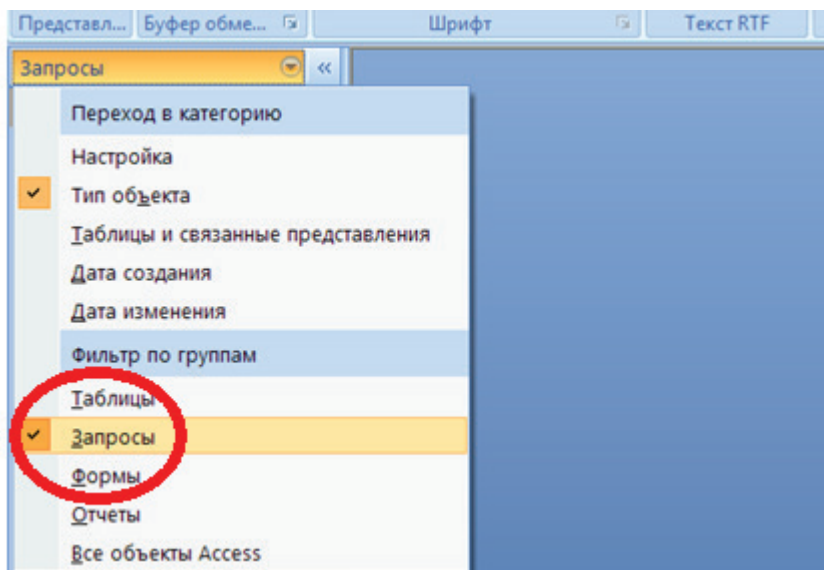


Рис. 5.33. Активизация опции *Запросы*

Для того чтобы открыть меню области переходов, следует нажать специальную кнопку, которая изображена на рис. 5.34.

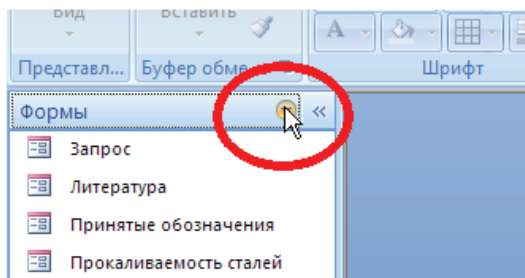


Рис. 5.34. Кнопка для открытия меню области переходов

3. Двойным щелчком левой клавиши мыши открываем опцию UG_STEEL Запрос (рис. 5.35).

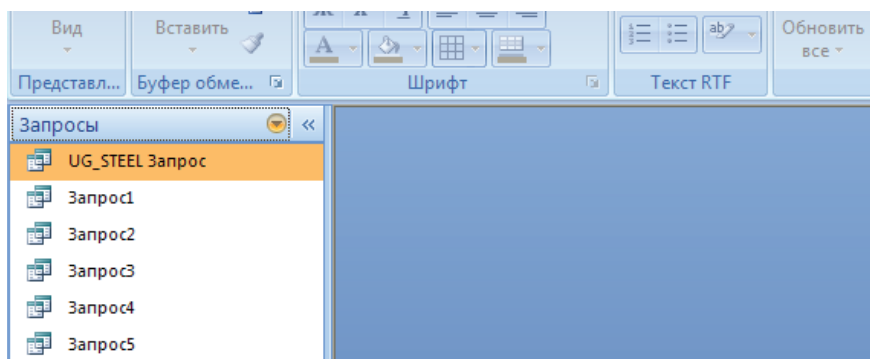


Рис. 5.35. Опция UG_STEEL Запрос

Должно появиться окно, как показано на рис. 5.36.

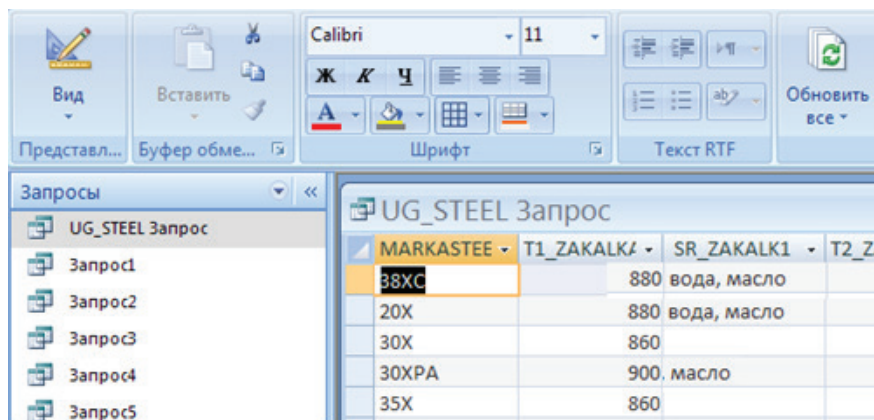


Рис. 5.36. Окно конструктора запросов

4. Открываем меню *Вид* в панели ACCESS (рис. 5.37).

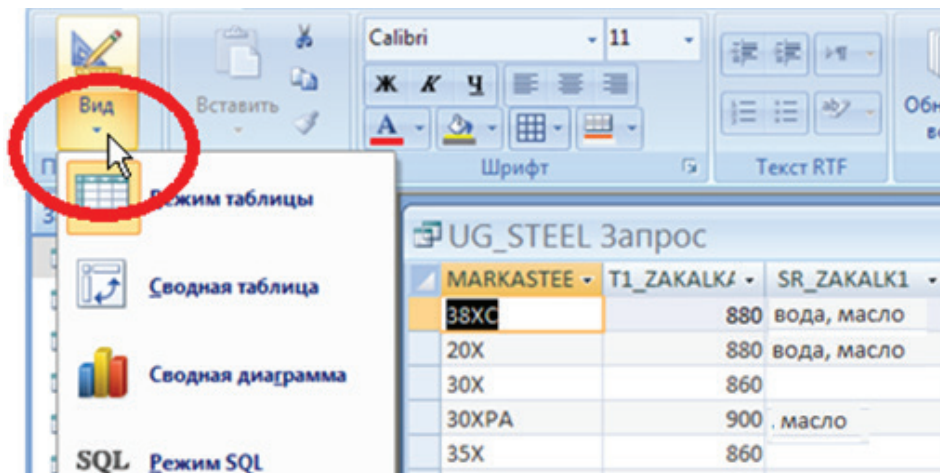


Рис. 5.37. Активизация опции *Вид*

5. В открывшемся меню выбираем пункт *Конструктор* (рис. 5.38).

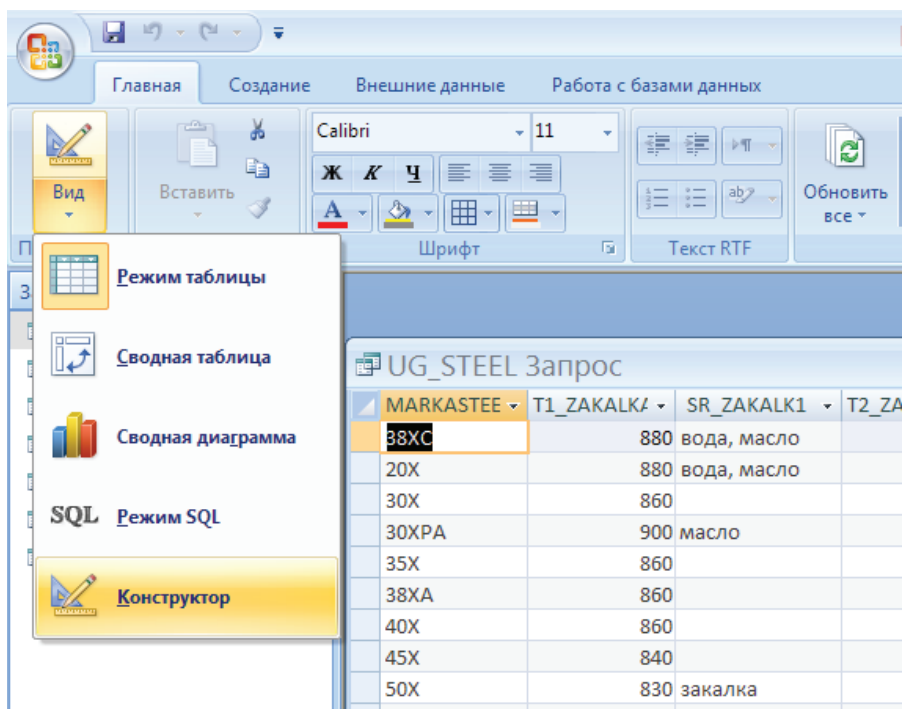


Рис. 5.38. Активизация пункта *Конструктор*

В результате появится окно, как показано на рис. 5.39. В таблице запроса имеются поля:

[MARKASTEEL] — марка стали;

[T1_ZAKALKA] — температура первой закалки;

[SR_ZAKALKA] — среда закалочная и др.

The screenshot shows a window titled "UG_STEEL Запрос". Inside, there is a list box containing the following fields: MARKASTEEL, T1_ZAKALKA, SR_ZAKALKA, T2_ZAKALKA, SR_OHLGD, and T_OTPUSKA. Below the list box is a table with four columns. The first column is labeled "Поле:" and contains the field names. The second column is labeled "Имя таблицы:" and contains "UG_STEEL". The third column is labeled "Сортировка:" and contains a green checkmark. The fourth column is labeled "Вывод на экран:" and contains a green checkmark. The fifth column is labeled "Условие отбора:" and contains a green checkmark. The sixth column is labeled "или:" and is empty.

| Поле: | Имя таблицы: | Сортировка: | Вывод на экран: | Условие отбора: | или: |
|--------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|------|
| [MARKASTEEL] | UG_STEEL | ✓ | ✓ | ✓ | |
| [T1_ZAKALKA] | UG_STEEL | ✓ | ✓ | ✓ | |
| [SR_ZAKALKA] | UG_STEEL | ✓ | ✓ | ✓ | |
| [T2_ZAKALKA] | UG_STEEL | ✓ | ✓ | ✓ | |

Рис. 5.39. Таблица запроса с принятыми обозначениями

6. Поля отбора нужно изменить, т. к. для данной задачи требуются следующие параметры: критический диаметр, предел текучести и твердость. Для этого нужно раскрыть меню в любом поле, например в поле [T1_ZAKALKA] (рис. 5.40).

The screenshot shows the same window as in Figure 5.39, but with a red circle highlighting the dropdown menu for the [T1_ZAKALKA] field. The dropdown menu is open, showing the same list of fields as in Figure 5.39. The mouse cursor is pointing at the [SR_ZAKALKA] field in the dropdown menu.

Рис. 5.40. Активизация меню для раскрытия заданных параметров

7. В падающем меню поля отбора выбираем пункт [KR_DIAMETR1], т. е. критический диаметр (рис. 5.41).

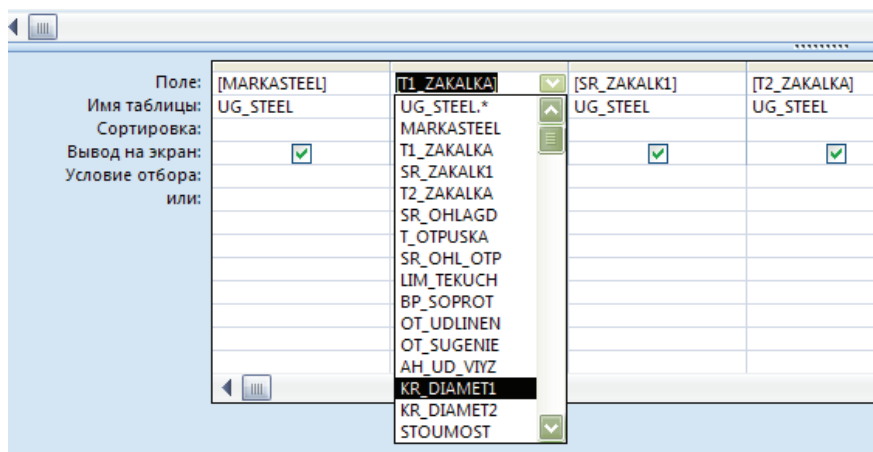


Рис. 5.41. Выбор технологического параметра

8. В следующих полях аналогичным способом выбираем опции [HBT], т. е. твердость, и [LIM_TEKUCH] — предел текучести (рис. 5.42).

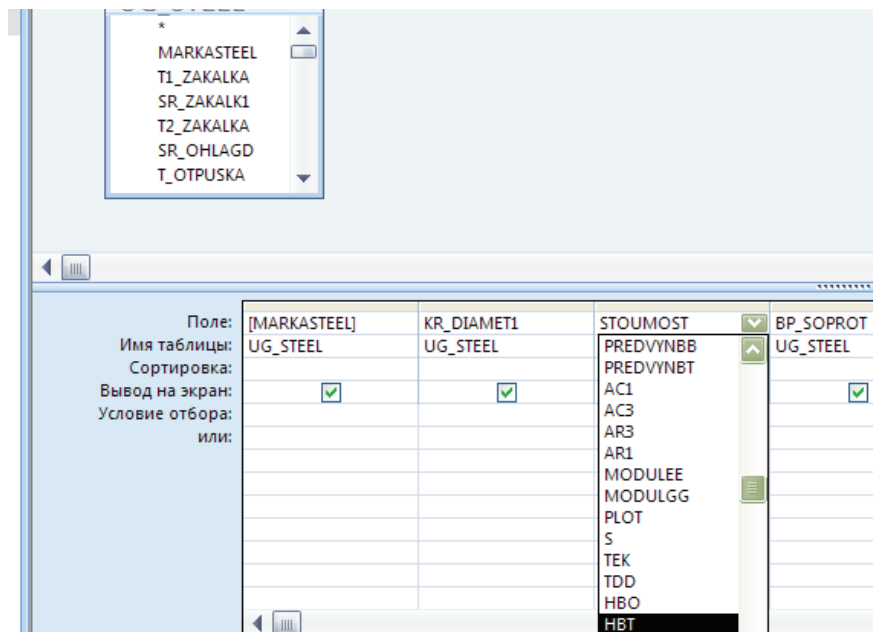


Рис. 5.42. Последовательный выбор технологических параметров

9. Вводим в строку *Условие отбора* необходимые значения. При этом можно использовать значки <, >, =.

Следует обратить внимание на следующее: в каждом поле должны стоять зеленые галочки; если подобный значок отсутствует, то этот параметр не будет учитываться при выборке. В обсуждаемой задаче необходимо использовать следующие параметры: марка стали, стоимость, временное сопротивление, ударная вязкость (рис. 5.43).

| Поле: | [MARKASTEEL] | KR_DIAMET1 | HBT | LIM_TKUCH | STOUMOST | BP_SOPROT | AH_UD_VNZ |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Имя таблицы: | UG_STEEL | UG_STEEL | UG_STEEL | UG_STEEL | UG_STEEL | UG_STEEL | UG_STEEL |
| Сортировка: | | | | | | | |
| Вывод на экран: | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Условие отбора: | | =25 | >=355 | >=700 | | | |
| или: | | | | | | | |

Рис. 5.43. Ввод заявленных параметров обсуждаемой стали

10. Для того чтобы вывести результат запроса, раскрываем меню *Вид* на панели инструментов ACCESS (рис. 5.44).

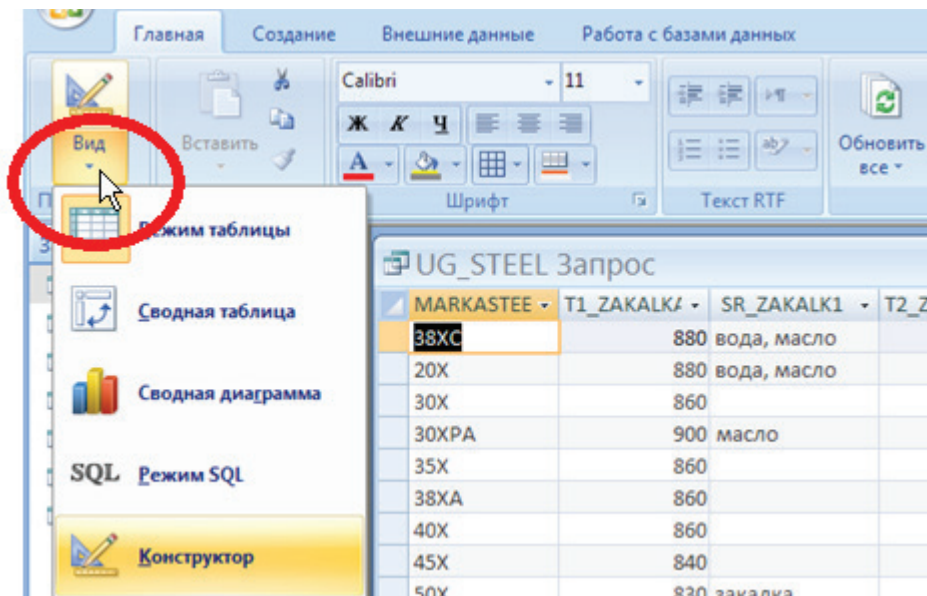
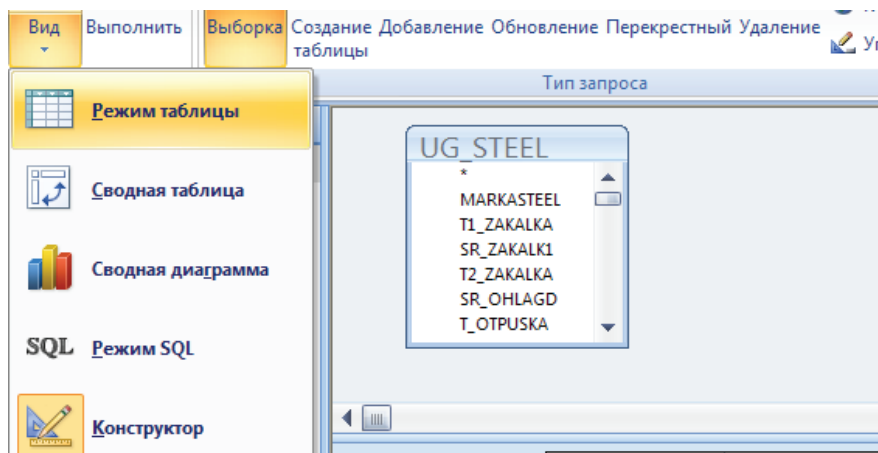


Рис. 5.44. Активизация опции *Вид*

11. В открывшемся меню выбираем пункт *Режим таблицы* (рис. 5.45).

Рис. 5.45. Выбор опции *Режим таблицы*

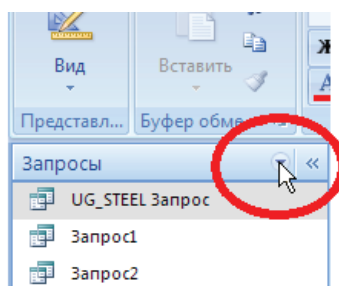
Результат запроса будет выглядеть следующим образом (рис. 5.46).

| MARKASTEE | KR_DIAMET | HBT | LIM_TEKUCH | STOUMOST | BP_SOPROT | AH_UD_VIY |
|-----------|-----------|-----|------------|----------|-----------|-----------|
| 38XC | 25 | 460 | 735 | 120 | 930 | 69 |
| 50ХФА | 25 | 514 | 825 | 140 | 1000 | 51 |
| СП90ДЗ-4 | 25 | 461 | 850 | 110 | 900 | 20 |
| * | | | | | | |

Рис. 5.46. Результат запроса

Приемлемым вариантом решения рассматриваемой задачи оказывается выбор стали 38XC.

12. Чтобы узнать описание стали 38XC, раскрываем меню области переходов. Для этого нажимаем специальную кнопку, которая изображена на рис. 5.47.

Рис. 5.47. Активизация опции *Запросы*

13. В открывшемся меню выбираем фильтр по группам *Формы* (рис. 5.48).

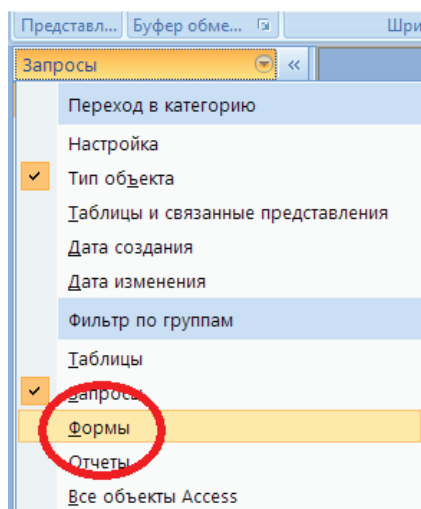


Рис. 5.48. Выделение опции *Формы*

14. Двойным щелчком левой кнопки мыши открываем в меню пункт *Работа с формами базы данных сталей* (рис. 5.49).

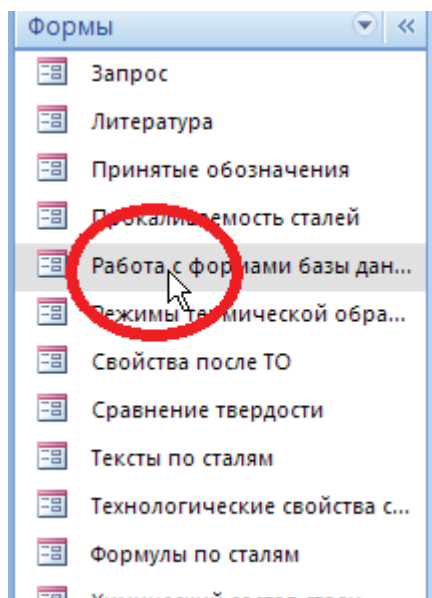


Рис. 5.49. Выделение пункта *Работа с формами базы данных сталей*

15. В строку *Марка стали* вводим соответствующую марку стали. В данном случае это сталь 38ХС (рис. 5.50).

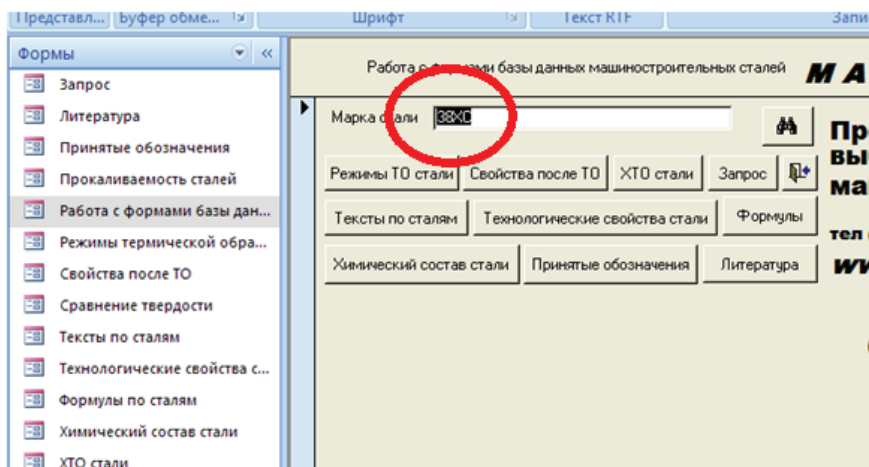


Рис. 5.50. Ввод маркированного символа стали

16. Затем нажимаем кнопку *Найти запись* (обозначена в виде иконки *Бинокль*). Далее в новом открывшемся окне указываем *Найти далее*, после чего закрываем это окно (рис. 5.51).

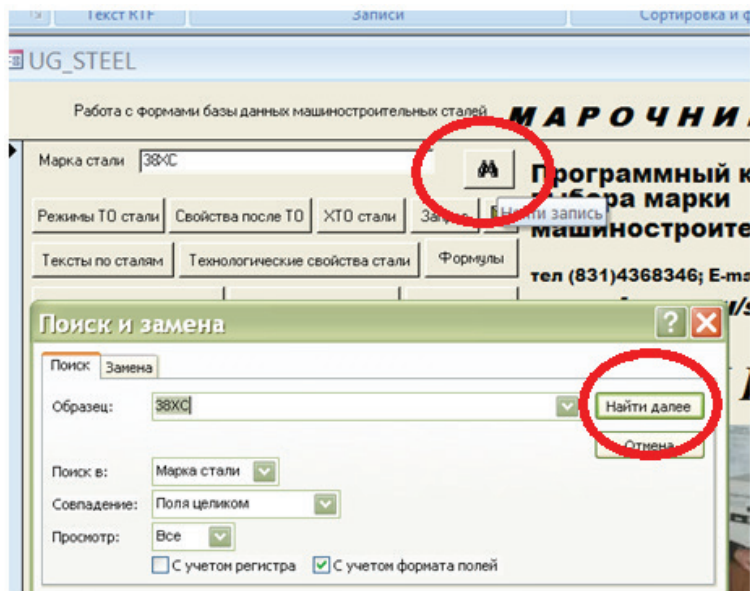


Рис. 5.51. Активизация опции *Найти далее*

17. После этого нажимаем кнопку *Режимы ТО стали* (рис. 5.52).

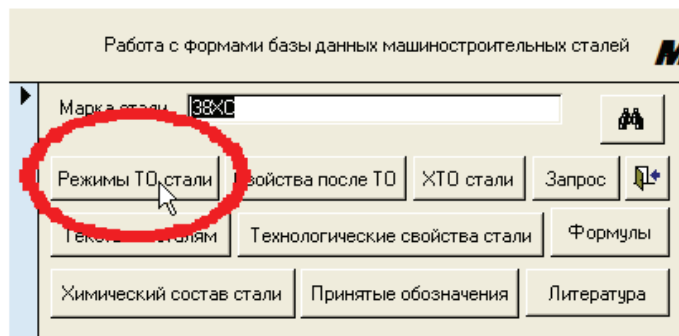


Рис. 5.52. Выбор команды *Режимы ТО стали*

А затем — значок *Найти запись* (см. иконку *Бинокль*) (рис. 5.53).

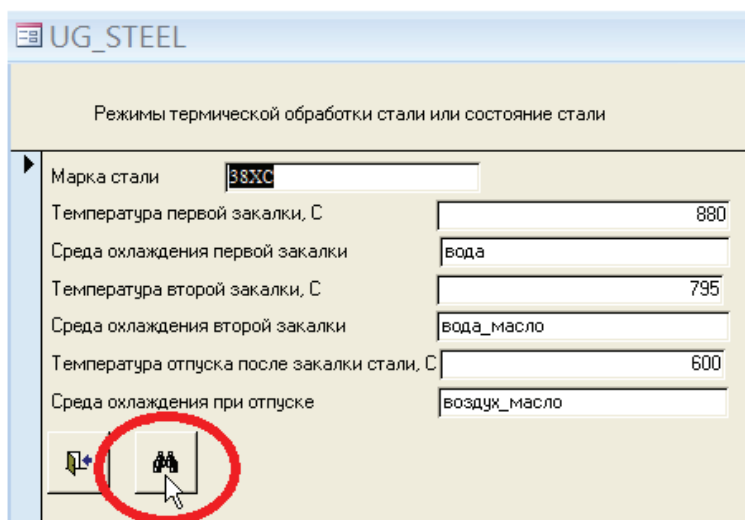


Рис. 5.53. Активизация опции *Найти запись*

18. В открывшемся окне нажимаем кнопку *Найти далее* (рис. 5.54).

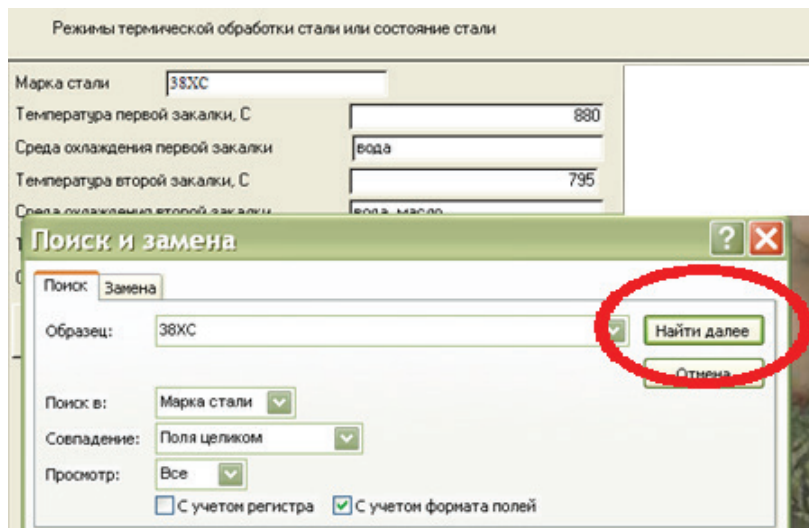


Рис. 5.54. Активизация опции *Найти далее*

При первом нажатии на кнопку *Найти далее* записи в окне, поясняющие режимы термической обработки, поменяются (рис. 5.55).

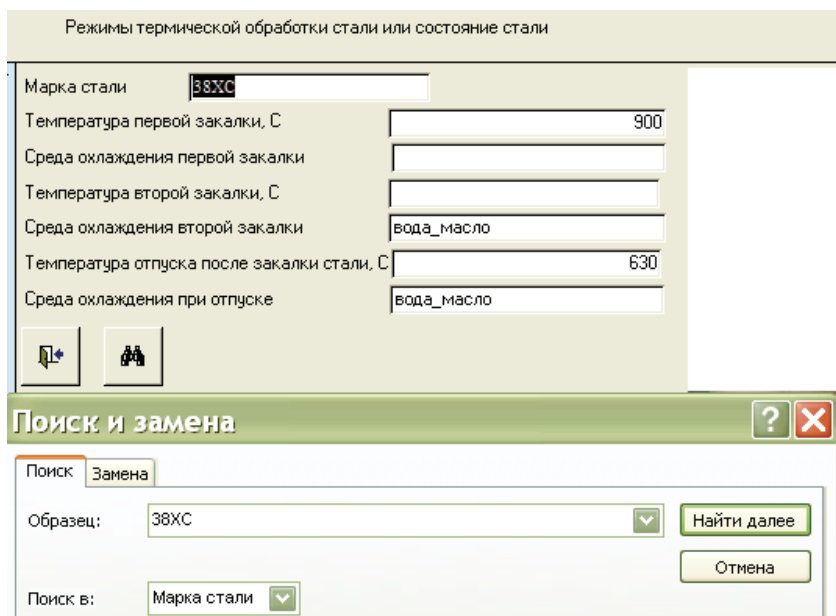


Рис. 5.55. Информация о режимах закалки и отпуска стали 38ХС

19. После ознакомления с информацией по термообработке нажимаем на значок *Заккрыть форму* (рис. 5.56).

Режимы термической обработки стали или состояние стали

Марка стали: 38ХС

Температура первой закалки, С: 900

Среда охлаждения первой закалки:

Температура второй закалки, С:

Среда охлаждения второй закалки: вода_масло

Температура отпуска после закалки стали, С: 630

Среда охлаждения при отпуске: вода_масло

Поиск и замена

Поиск: Замена

Образец: 38ХС

Найти далее

Отмена

Рис. 5.56. Завершение процедуры ознакомления с режимами термообработки

20. Аналогичным образом действуем в остальных пунктах окна *Работа с формами данных машиностроительных сталей* (рис. 5.57):

Свойства после ТО, Тексты по сталям, Технологические свойства сталей, Формулы по сталям, Химический состав стали, ХТО стали.

Работа с формами базы данных машиностроительных сталей

Марка стали: 38ХС

Режимы ТО стали | Свойства после ТО | ХТО стали | Запрос

Тексты по сталям | Технологические свойства стали | Формулы

Химический состав стали | Принятые обозначения | Литература

Рис. 5.57. Перечень характеристик, которые можно получить в соответствии с запросом относительно стали 38ХС

После получения достаточно полной информации о выбранной в качестве замены стали 38ХС поставленную задачу можно считать решенной.

5.3.2. Комментарии для пользователя

В заключение сделаем некоторые замечания, которые могут оказаться полезными при работе с программой.

1. По аналогии работы с пунктом *Работа с формами данных стали* нужно выполнить соответствующие процедуры со всеми остальными пунктами меню *Формы*, т. е. заказать опции *Запрос*, *Литература* и т. д., вплоть до *ХТО стали* (рис. 5.58).

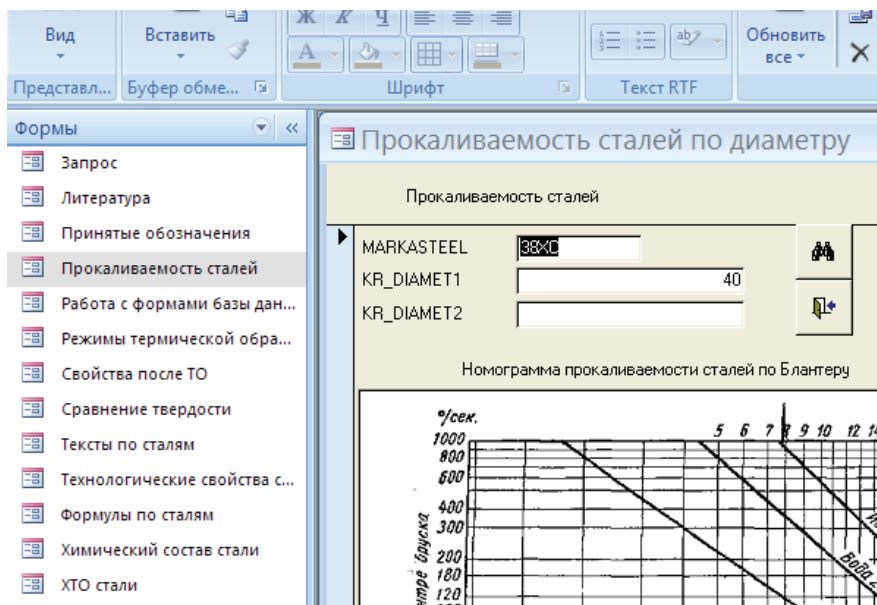


Рис. 5.58. Перечень форм, по которым можно получить необходимую информацию

2. Чтобы просмотреть принятые обозначения для полей отбора, в области переходов можно выбрать *Фильтр по группам* (рис. 5.59).

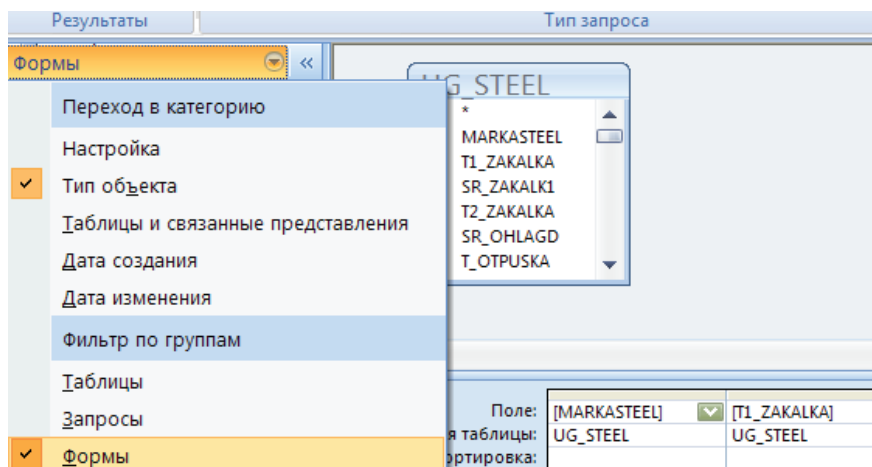


Рис. 5.59. Опция *Фильтр по группам*

В открывшемся меню двойным щелчком левой кнопки мыши откроем *Принятые обозначения*. Появится окно *Некоторые принятые обозначения в БД сталей* (рис. 5.60).

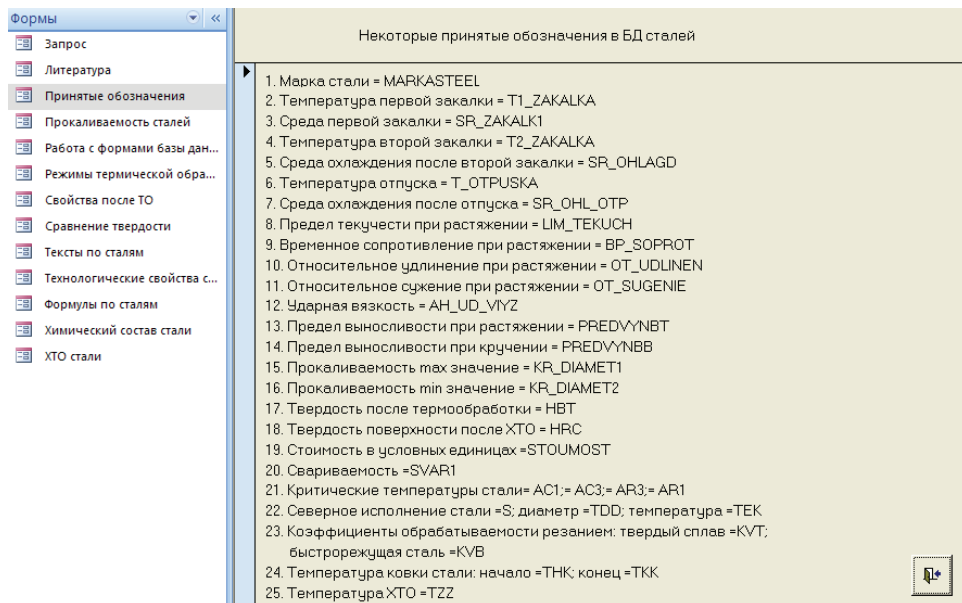


Рис. 5.60. Окно *Некоторые принятые обозначения в БД сталей*

Библиографический список

1. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении : учебное пособие: в 2 т. / М. А. Филиппов, В. Р. Бараз, М. А. Гервасьев, М. М. Розенбаум. — 2-е изд., испр. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. — Т. 1. — 232 с. — Т. 2. — 236 с.
2. Геллер Ю. А. Материаловедение / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. — М. : Металлургия, 1989. 456 с.
3. Конструкционные материалы. Справочник / под ред. Б. Н. Арзамасова. — М. : Машиностроение, 1990. — 414 с.
4. Журавлев В. Н. Машиностроительные стали. Справочник / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. — М.: Машиностроение, 1992. — 480 с.
5. Строеие и свойства авиационных материалов / под ред. А. Ф. Белова. — М. : Металлургия, 1989. — 368 с.
6. Термическая обработка в машиностроении. Справочник / под ред. Ю. М. Лахтина. — М. : Машиностроение, 1980. — 784 с.
7. Стали и сплавы: марочник / под ред. В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева. — М. : Интермет инжиниринг, 2003. — 608 с.
8. Чугун. Справочник / под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. — М. : Металлургия, 1991. — 576 с.
9. Прецизионные сплавы / под ред. Б. В. Молотилова. — М. : Металлургия, 1983. — 384 с.
10. Зоткин В. Е. Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении / В. Е. Зоткин. — М. : ИД «Форум»-Инфра-М. 2008. — 320 с.
11. Сильман Г. И. Материаловедение / Г. И. Сильман. — М. : Инфра-М. 2009. — 355 с.

Оглавление

| | |
|---------------|---|
| Введение..... | 3 |
|---------------|---|

Глава 1.

Общие сведения о металлах и основные положения

| | |
|-----------------------------|---|
| термической обработки | 8 |
|-----------------------------|---|

| | |
|-----------------------------------|---|
| 1.1. Классификация металлов | 8 |
|-----------------------------------|---|

| | |
|--|----|
| 1.2. Классификация сплавов по способу технологической обработки | 11 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| 1.3. Разновидности термической обработки..... | 12 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| 1.4. О термической обработке стали | 16 |
|--|----|

| | |
|---------------------------------|----|
| 1.5. Классификация сталей | 18 |
|---------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 1.5.1. Классификация по назначению | 18 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| 1.5.2. Классификация по химическому составу | 19 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| 1.5.3. Классификация по качеству | 19 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 1.5.4. Классификация по прочности..... | 22 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| 1.5.5. Классификация по степени раскисления | 23 |
|---|----|

Глава 2.

| | |
|---|----|
| Назначение различных марок сталей и сплавов | 25 |
|---|----|

| | |
|----------------------------------|----|
| 2.1. Конструкционные стали | 25 |
|----------------------------------|----|

| | |
|----------------------------------|----|
| 2.2. Инструментальные стали..... | 29 |
|----------------------------------|----|

| | |
|-------------------|----|
| 2.3. Чугуны | 31 |
|-------------------|----|

| | |
|--|----|
| 2.4. Жаростойкие, жаропрочные, коррозионно-стойкие и износостойкие стали и сплавы | 32 |
|--|----|

| | |
|---------------------------|----|
| 2.5. Цветные сплавы | 34 |
|---------------------------|----|

Глава 3.**Выбор стальных и чугунных материалов****с использованием справочных данных 36**

- 3.1. Выбор марки конструкционной стали и технологического режима ее упрочняющей обработки для типовых деталей машин 37
 - 3.1.1. Рекомендации по выбору марки стали и технологии ее упрочняющей обработки..... 37
 - 3.1.2. Выбор марки стали по критическому диаметру прокаливаемости 37
 - 3.1.3. Стоимость металлических сплавов 41
 - 3.1.4. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из конструкционных сталей 45
- 3.2. Принципы выбора инструментальных сталей и технологий их упрочняющих обработок 48
 - 3.2.1. Классификация, маркировка и принципы выбора инструментальных сталей 48
 - 3.2.2. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из инструментальной стали 51
- 3.3. Стали, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды..... 52
 - 3.3.1. Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали 53
 - 3.3.2. Жаростойкие (окалиностойкие) стали 57
 - 3.3.3. Жаропрочные стали..... 59
 - 3.3.4. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из коррозионно-стойких сталей 67
- 3.4. Чугуны 68
 - 3.4.1. Основная характеристика чугунов..... 68
 - 3.4.2. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из чугунов..... 76

Глава 4.**Выбор материалов на основе цветных сплавов 79**

- 4.1. Медные сплавы 79
 - 4.1.1. Латунь 80
 - 4.1.2. Бронзы 84
 - 4.1.3. Медно-никелевые сплавы..... 91
 - 4.1.4. Применение меди и ее сплавов..... 93

| | |
|---|-----|
| 4.1.5. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из медных сплавов | 95 |
| 4.2. Алюминиевые сплавы | 96 |
| 4.2.1. Литейные алюминиевые сплавы..... | 98 |
| 4.2.2. Деформируемые алюминиевые сплавы..... | 101 |
| 4.2.3. Порошковые сплавы | 104 |
| 4.2.4. Особенности термообработки алюминиевых сплавов | 105 |
| 4.2.5. Способы обработки алюминиевых сплавов | 106 |
| 4.2.6. Применение алюминиевых сплавов | 107 |
| 4.2.7. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из алюминиевых сплавов..... | 109 |
| 4.3. Магниевые сплавы | 110 |
| 4.3.1. Литейные магниевые сплавы | 112 |
| 4.3.2. Деформируемые магниевые сплавы | 115 |
| 4.3.3. Термическая обработка магниевых сплавов | 118 |
| 4.3.4. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из магниевых сплавов | 122 |
| 4.4. Титановые сплавы | 123 |
| 4.4.1. Литейные титановые сплавы | 126 |
| 4.4.2. Деформируемые титановые сплавы..... | 128 |
| 4.4.3. Термообработка титановых сплавов..... | 135 |
| 4.4.4. Области применения титана и его сплавов | 138 |
| 4.4.5. Пример решения задачи по выбору изделий из титановых сплавов | 139 |
| 4.5. Никелевые сплавы | 140 |
| 4.5.1. Жаропрочные сплавы..... | 141 |
| 4.5.2. Конструкционные сплавы | 145 |
| 4.5.3. Электротехнические сплавы на никелевой основе | 145 |
| 4.5.4. Сплавы с особыми физическими и химическими свойствами..... | 146 |
| 4.5.5. Применение никеля и его сплавов | 148 |
| 4.5.6. Пример решения задачи по выбору материала для изделий из никелевых сплавов | 150 |

Глава 5.**Использование компьютерных программ**

| | |
|---|------------|
| для решения задач по выбору материалов и технологий..... | 151 |
| 5.1. Описание программного комплекса СТАЛЬ | 151 |
| 5.2. Пример решения задачи с использованием программного модуля СТАЛЬ..... | 155 |
| 5.2.1. Последовательность решения задачи | 155 |
| 5.2.2. Комментарии для пользователя..... | 167 |
| 5.3. Пример решения задачи с использованием базы данных программного комплекса СТАЛЬ | 167 |
| 5.3.1. Последовательность решения задачи | 172 |
| 5.3.2. Комментарии для пользователя..... | 184 |
| Библиографический список..... | 186 |

Учебное издание

Бараз Владислав Рувимович
Филиппов Михаил Александрович
Гервасьев Михаил Антонович

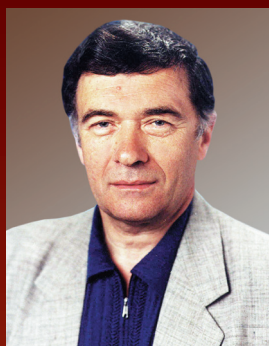
**НАЗНАЧЕНИЕ И ВЫБОР
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Редактор О. С. Смирнова
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 17.03.2016. Формат 70×100/16.
Бумага писчая. Печать цифровая. Гарнитура Newton.
Уч.-изд. л. 10,42. Усл. печ. л. 15,5. Тираж 150 экз.
Заказ 17

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8(343)375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8(343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: 8(343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru



БАРАЗ ВЛАДИСЛАВ РУВИМОВИЧ

Профессор кафедры металловедения Уральского федерального университета, доктор технических наук. Изобретатель СССР, почетный работник высшего специального образования, лауреат премии им. Д. К. Чернова, почетный выпускник УГТУ-УПИ. Специалист в области физического материаловедения. Основные труды посвящены созданию научных основ получения высокопрочных и теплостойких пружинных сплавов аустенитного класса, а также прецизионных сплавов элинварного типа. Особое место занимают исследования по разработке технологии поверхностного пластического деформирования сплавов на железной и медной основах.



ФИЛИПОВ МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

Профессор кафедры металловедения Уральского федерального университета, доктор технических наук, чл.-корр. Академии инженерных наук РФ. Изобретатель СССР, почетный работник высшего специального образования РФ, почетный выпускник УГТУ-УПИ. Лауреат премий им. Д. К. Чернова, им. Черепановых. Основные направления научной работы — изучение фазовых превращений в сплавах, наплавочных материалах и напыленных покрытиях и решение на этой основе проблем повышения надежности и долговечности быстроизнашивающегося оборудования; разработка новых износостойких сплавов и сталей на основе марганцевого и хромистого аустенита и методов их упрочнения.



ГЕРВАСЬЕВ МИХАИЛ АНТОНОВИЧ

Заведующий кафедрой металловедения Уральского федерального университета, инженер-металлург по специальности «Физика металлов», доктор технических наук, профессор. Изобретатель СССР, почетный работник высшего специального образования РФ, заслуженный металлург РФ, почетный выпускник УГТУ-УПИ. Приоритетное научное направление — изучение закономерностей формирования структуры и свойств конструкционных сталей, разработка их составов и технологии термической обработки. Создатель серии экономно-легированных и хладостойких сталей для поковок и отливок различного уровня прочности и назначения.